

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ПЕТРА ВЕЛИКОГО

А. О. Костромитин, О. И. Котов,
Л. Б. Лиокумович, А. В. Соколов

**МЕТОДИКА РАСЧЕТА
ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ
ПЕРЕДАЧИ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМ ДОСТУПОМ**

Учебное пособие

ПОЛИТЕХ-ПРЕСС

Санкт-Петербург

2019

Р е ц е н з е н т ы:

Доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник,
заведующий лабораторией ФТИ им. А.Ф. Иоффе

А.В. Шамрай

Доктор технических наук, главный научный сотрудник АО «ЦНИИ
«Электроприбор»

М.А. Ероньян

Костромитин А.О., Котов О.И., Лиокумович Л.Б., Соколов А.В.

**Методика расчета волоконно-оптических систем передачи с
распределенным доступом:** Костромитин А.О., Котов О.И., Лиокумович
Л.Б., Соколов А.В. – СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2019. – 84 с.

Пособие знакомит студентов с методами расчета основных параметров волоконно-оптических систем передачи (ВОСП), определяющих их энергетические характеристики и быстродействие. Приведены конкретные примеры расчетов ВОСП для аналоговых и цифровых сигналов и разных типов волоконных световодов (одномодовых и многомодовых). В приложениях представлены табличные данные параметров основных элементов ВОСП. Рассмотрены отношение сигнал/шум (SNR), минимальная принимаемая мощность (P_{\min}) и эквивалентная шумовая мощность (NEP) в зависимости от параметров выбранной схемы.

Пособие также полезно аспирантам, инженерам, научным сотрудникам, работающим в области волоконной оптики и систем передачи данных.

Табл. 6. Ил. 21. Библиогр. 11.

Печатается по решению

Совета по издательской деятельности Ученого совета

Санкт-Петербургского политехнического университета

Петра Великого

1. Введение

1.1 Основные положения

Проектирование оптических систем связи на основе волоконных световодов определяется рядом основных требований: назначением, скоростью передачи информации (шириной полосы), вероятностью ошибки (отношением сигнал/шум), расстоянием между терминалами (оконечными устройствами). Кроме этих основных условий проектирование должно учитывать также ряд дополнительных факторов: свойства окружающей среды, климатические условия, стоимость, надежность, возможность наращивания и модернизации, размеры, вес, энергопотребление, помехозащищенность, стоимость. В данном пособии изложены основы проектирования волоконных систем передачи информации с использованием упрощенной методики расчета, приведены примеры проектирования относительно простых практических систем на волоконных световодах разных типов.

Волоконно-оптические системы передачи (ВОСП) можно использовать для распределения информационных сигналов разных типов между разнесенными абонентами (потребителями), которые, в общем случае, связываются в многонаправленную систему распределения данных. Такие системы могут использоваться в летательных аппаратах, на кораблях, в компьютерных сетях, во внутриобъектовой связи, на заводах и энергетических станциях, в системах кабельного телевидения.

Анализ ВОСП будем проводить, предполагая два вида передаваемого сигнала:

- Аналоговый сигнал, характеризуемый полосой частот ΔF (измеряемой в Гц) и отношением мощностей сигнала и шума SNR (signal to noise ratio, либо безразмерная величина, либо представленная в дБ).

- Цифровой ИКМ (импульсно-кодовая модуляция) сигнал, характеризуемый скоростью передачи B (измеряемой в бит/с), вероятностью ошибки BER (bit-error rate, безразмерная величина) и типом кодирования бит:

с «возвращением в ноль» - *RZ* (return to zero) или с «невозвращением в ноль» - *NRZ* (non return to zero).

В качестве характерных и относительно простых топологических структур ВОСП в данном пособии рассмотрены две структуры на основе пассивных волоконных распределительных устройств.

Первая структура - последовательная система распределения информации типа «линия», рис. 1,а. Информация передается от источника к N принимающим абонентам по световодной «шине» с направленными ответвителями. Система отличается простотой, требует относительно небольшой общей длины волоконного световода. Она является упрощенным примером волоконной системы кабельного телевидения и т.п. систем «абонентского доступа».

Вторая структура - параллельная система связи типа «звезда» является примером организации сети, связывающей друг с другом N приемопередающих абонентов, рис. 1,б. Представленная схема требует относительно большого количества волокна, но эффективна с точки зрения экономичного распределения оптической мощности между абонентами.

Реальные современные системы сетевых ВОСП с распределенным доступом имеют значительно более сложные структуры с элементами разной топологии (линейная, кольцевая, звездообразная, древовидная, сетчатая), с совмещением пассивных волоконно-оптических и активных оптоэлектронных устройств распределения сигнала. Расчет таких систем сложен, а строгое обобщенное рассмотрение трудно реализуемо.

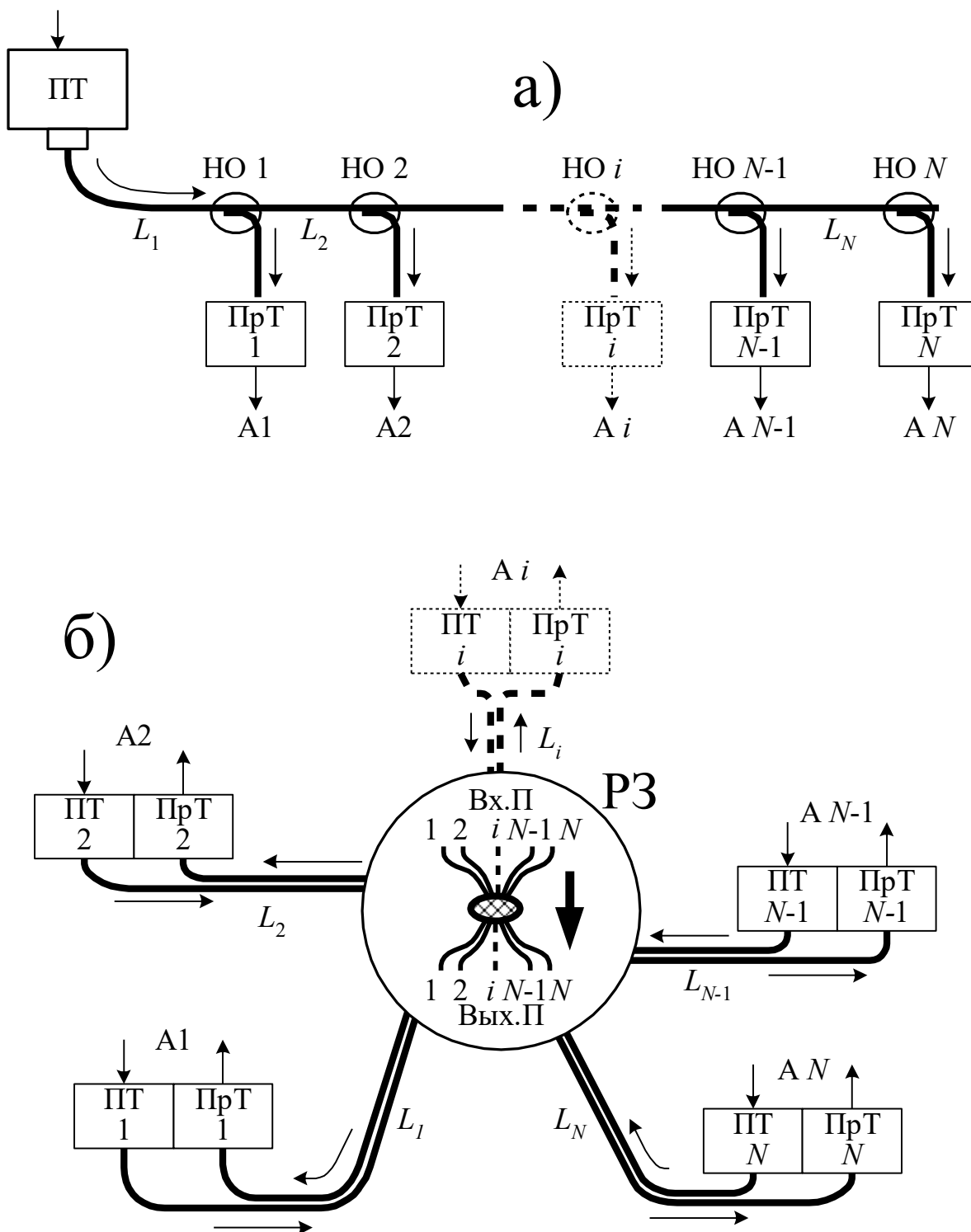


Рис. 1. Структурные схемы волоконных линий с пассивными волоконными элементами распределения данных:

а) система абонентского доступа типа "линия", б) система связи между абонентами типа "звезда". А – абонент, ПТ - передающий терминал, ПрТ - приемный терминал, НО - направленный ответвитель, РЗ - разветвитель "звезда", Вх.П - входной волоконный порт, Вых.П - выходной волоконный порт

Даже для выбранных относительно простых структур «линия» и «звезда», показанных на рисунке 1, полный анализ может оказаться сложным в связи большим количеством параметров. При временном пренебрежении рассмотрением финансовых вопросов, сроков окупаемости, эксплуатационных требований к устройствам и т.п., основные инженерные расчеты при разработке рассматриваемых систем концентрируются вокруг выработки требований и выбора таких компонент, как источники оптического излучения, фотоприемники, волоконные кабели, элементы пассивного разветвления. В процессе анализа волоконно-оптических систем передачи, двумя главными факторами являются величина оптической мощности и быстродействие всей системы. Соответственно расчет системы обычно разбивается на два этапа - энергетический расчет и расчет быстродействия.

В применяемой ниже методике расчета ВОСП используется подход «двух худших» абонентов. То есть, весь расчет проводится для двух абонентов, находящихся в наихудших условиях, в данном случае наиболее удаленных друг от друга. В конфигурации «Линия» выбирается случай связи последнего абонента с источником сигналов. В конфигурации «Звезда» выбирается случай связи двух наиболее удаленных от разветвителя абонентов (при равном удалении на расстоянии двух радиусов). При этом признается верным утверждение: если выполняется условие качественного приема для «наихудших абонентов», то оно тем более выполняется для всех других абонентов. Это не означает, что при таком подходе не учитываются другие абоненты кроме «наихудших». Затраты оптической мощности на других абонентов рассматриваются как потери для рассматриваемых абонентов в энергетическом расчете в разделе «Потери в схеме распределения данных».

1.2 Задание для расчета

Для выполнения указанных выше расчетов необходимо сформулировать «ЗАДАНИЕ» с указанием всех необходимых исходных данных. Последние

могут определяться «заказчиком» проекта, или, в данном случае, преподавателем. В задании содержатся параметры ВОСП, которые не подлежат расчету, но необходимы для выполнения численных оценок энергетического баланса и условия быстродействия.

Пример задания представлен ниже.

Выполнить расчет (энергетический и по быстродействию) волоконно-оптической системы передачи данных со следующими исходными параметрами:

- конфигурация структуры «Звезда» с равными длинами радиусов $L_i=5$ км;
- число терминалов $N=8$;
- рабочая длина волны $\lambda = 1300$ нм;
- тип волоконного световода – многомодовый;
- тип передаваемого сигнала – аналоговая модуляция;
- ширина спектра передаваемых сигналов - 70 МГц;
- отношение сигнал/шум (по мощности после фотоприемника) - 55дБ;
- температурный диапазон для оптоэлектронных элементов 10-30°C при наличии системы термостабилизации;
- соединение разветвителя «звезда» с основными световодами осуществляется посредством сварки, присоединение оптического источника и фотоприемника через оптические разъемы.

Для случая цифровых сигналов с ИКМ модуляцией задаются скорость передачи потока данных B в Мбит/с и допустимая вероятность ошибок BER , например: $B = 110$ Мбит/с и $BER = 10^{-9}$.

В учебном варианте задания могут отсутствовать некоторые параметры. Например, не задано количество абонентов N или расстояние между абонентами L_i . В таком случае перед выполнением расчетов студент самостоятельно выбирает отсутствующий параметр, который может

корректироваться в ходе выполнения расчетов. Это несколько упрощает достижение энергетического баланса и выполнения условия быстродействия, но развивает навык корректного выбора подходящих для данной задачи элементов.

1.3 Порядок выполнения курсового задания

В рамках курса «Волоконно-оптические системы» предусмотрена расчетная курсовая работа, состоящая, как правило, из трех независимых вариантов «Волоконно-оптических много абонентских систем передачи данных», параметры которых заданы преподавателем. Наиболее часто встречаются варианты с разными длинами волн, типами волоконных световодов, конфигурациями структуры и скоростями передаваемых сигналов.

Для успешного выполнения всего курсового задания с меньшими временными затратами предлагается следующий порядок его выполнения.

Первый этап: полное (сквозное) изучение данного учебного пособия, освоение методов расчета параметров ВОСП. Задачи данного этапа выполняются в ходе самостоятельной работы студентов и в ходе учебных практических занятий.

Второй этап: выбор основных элементов ВОСП и определение их параметров необходимых для полного расчета. На данном этапе студенты самостоятельно выбирают на основе любых доступных источников информации подходящие для расчета источники света, волоконные световоды и фотоприемные устройства. Корректность выбора элементов определяется наличием в перечне данных необходимых для расчета параметров и их соответствием требованиям **Задания**. Некоторые особенности данного этапа рассмотрены в следующем параграфе.

На третьем этапе выполняется энергетический расчет параметров ВОСП с использованием найденных характеристик элементной базы и

методов расчета, освоенных на первом этапе. В конечной части этого расчета оценивается энергетический бюджет системы, то есть определяется баланс между допустимыми и полученными в ходе расчета потерями оптической мощности сигналов в данной ВОСП. Если потери не превысили допустимые, то можно переходить к следующему этапу – расчету быстродействия. Если потери превысили допустимые (баланс оказался отрицательным), необходимо провести последовательный анализ расчета и определить места повышенных оптических потерь. Далее, используя «свободные параметры» или изменив оптоэлектронные элементы на более подходящие, повторить энергетический расчет и добиться положительного баланса. Затем следует перейти к следующему этапу расчета.

На четвертом этапе проводится расчет быстродействия данной ВОСП. При этом используются параметры выбранных элементов (с учетом результатов третьего этапа) и методы расчета быстродействия системы, полученные на первом этапе. В конечной стадии этого расчета определяется баланс ВОСП по быстродействию. В случае положительного баланса (т.е. быстродействие системы лучше допустимого) расчет системы можно считать выполненным удовлетворительно. В случае отрицательного результата необходимо провести коррекцию расчета для выполнения положительного баланса. В некоторых случаях, возможно, потребуются коррекция и энергетического расчета с учетом требований к параметрам ВОСП необходимых для выполнения условий быстродействия.

На пятом этапе выполнения курсового задания проводятся расчеты ВОСП по другим вариантам (например, для других длин волн) по изложенным выше методикам. А также выполняется сравнительный анализ всех результатов расчета, выявляющий положительные и отрицательные стороны спроектированных систем ВОСП.

2. Предварительный выбор элементов ВОСП и оценка их параметров

В ходе выполнения курсового задания студенты самостоятельно выбирают основные элементы ВОСП: источники света, волоконные световоды и фотоприемные устройства. При этом может использоваться различная доступная информация – справочные пособия, технические данные продукции мировых производителей, рекламная информация фирм производящих оптоэлектронные элементы и др. Как правило, в представляемой информации содержится большое количество данных, характеризующих продукцию по многим параметрам. Это могут быть данные по электрическим, оптическим, механическим, эксплуатационным и другим параметрам устройства. Для выполнения инженерного расчета работоспособной ВОСП интерес представляют лишь некоторые из них. В данном параграфе рассматриваются вопросы выбора подходящих элементов для полного расчета ВОСП, определения их необходимых характеристик и представления найденных параметров в удобном для дальнейшего расчета виде.

Исходя из требований расчета, целесообразно выделить три группы параметров основных элементов ВОСП:

- спектральные параметры, зависящие от длины волны света;
- энергетические параметры, определяющие оптическую мощность;
- параметры быстродействия (время нарастания или полоса частот).

Трудность определения данных параметров заключается в разнообразии форм их представления. В задачу выполнения курсового задания входит нахождение необходимых параметров и представление их в форме удобной для проведения дальнейших расчетов. Далее даны некоторые рекомендации по работе с техническими характеристиками источников света, фотоприемников и волоконных световодов.

2.1 Источники света для ВОСП

К спектральным параметрам источников света следует отнести центральную длину волны λ и ширину линии излучения $\Delta\lambda$, обычно приводимые в мкм или в нм. Наиболее часто для ВОСП необходимы источники света для трех окон прозрачности волоконных световодов с $\lambda_1=0,85$ мкм, $\lambda_2= 1,3$ мкм и $\lambda_3=1,55$ мкм. Эту информацию об источнике нужно найти в первую очередь. Затем определяется ширина линии $\Delta\lambda$. Она может быть указана непосредственно, например, $\Delta\lambda_1=0,2$ нм или $\Delta\lambda_2=2,3$ нм. Первая из указанных величин $\Delta\lambda_1=0,2$ нм характерна для лазерных полупроводниковых источников с селекцией продольных мод. К ним относятся лазеры типа DFB (с распределенной обратной связью) или DBR (с распределенными брегговскими отражателями). Вторым случаем с $\Delta\lambda_2=2,3$ нм характерен для лазеров с оптическим резонатором типа интерферометра Фабри-Перо (Fabry-Perot resonator, сокращенно F-P resonator) без каких-либо устройств для селекции продольных мод. Если не указана ширина линии, то можно сделать оценку ее величины, используя информацию о типе оптического резонатора: в случае указаний на DFB или DBR resonator можно применять для расчетов $\Delta\lambda_1=0,2$ нм; для случая F-P resonator следует использовать $\Delta\lambda_2=2-3$ нм.

Если для проекта выбран некогерентный источник света, такой как полупроводниковый светоизлучающий диод (СИД), то для оценки его ширины линии можно использовать следующие данные: для $\lambda_1=0,85$ мкм, $\Delta\lambda_1=30$ нм, для $\lambda_2=1,3$ мкм, $\Delta\lambda_2=70$ нм, для $\lambda_3=1,55$ мкм, $\Delta\lambda_3=100$ нм.

Отметим, что для снижения вклада в быстроедействие хроматической дисперсии необходимо выбирать источники света с минимально возможными ширинами линий излучения. С этих позиций предпочтительны лазеры с селекцией продольных мод и $\Delta\lambda_1=0,2$ нм; или светодиоды с $\Delta\lambda_1=30$ нм.

К энергетическим параметрам источников света относят мощность излучения P_0 и, в некоторых случаях, относительную шумовую мощность RIN (relative intensity noise).

Для оптических систем связи существуют ограничения по максимальной величине мощности источника, определяемые появлением нелинейных процессов, таких как фазовая самомодуляция и Бриллюэновское рассеяние. Указанные процессы вызывают преобразование оптического спектра излучения и приводят к перекрестным помехам в современных системах с волновым уплотнением каналов. Для предотвращения нелинейных процессов максимально вводимая мощность в волокно ограничивается величиной 30-40 мВт.

Часто для ВОСП полупроводниковые источники света изготавливаются с волоконным выходом, т.н. пигтэйлом (fiber pigtail), оканчивающимся оптическим разъемом. В таких случаях изготовитель указывает мощность излучения на выходном торце разъема. Кроме того отметим, что выходная оптическая мощность может быть указана в логарифмических единицах дБм, которые рассчитываются по формуле $[дБм]=10 \cdot \lg(P_0/1мВт)$. Типичные величины выходной мощности лазеров составляют 0-15 дБм.

В современных полупроводниковых лазерах уровень шумов интенсивности достаточно мал $RIN \sim -150 дБ \cdot Гц^{-1}$. Это означает, что при полосе приемника 1000 МГц отношение интенсивности шума к средней оптической интенсивности имеет величину $\sim 10^{-3}$. Поэтому вкладом лазерных шумов интенсивности в суммарное отношение сигнал/шум на выходе фотоприемного устройства можно пренебречь ввиду их малости по сравнению с другими источниками шума (тепловыми и дробовыми шумами).

Быстродействие полупроводниковых источников света

характеризуется тремя возможными способами: 1) временем нарастания $\tau_{нар}$ [нс], 2) полосой модулирующих частот ΔF [МГц], 3) скоростью цифрового потока информации V [Мбит/с]. Далее в расчете быстродействия будет

использоваться такой параметр как время нарастания. Для пересчета других параметров во время нарастания можно воспользоваться формулами связывающими эти величины: $\tau_{\text{нар}} = 0,35/\Delta F$ или $\tau_{\text{нар}} = 0,35/B$ для аналоговых сигналов и ИКМ сигналов RZ типа; и $\tau_{\text{нар}} = 0,7/B$ для ИКМ сигналов NRZ типа.

2.2 Фотоприемные устройства для ВОСП

Спектральные характеристики. Все фотоприемники характеризуются диапазоном длин волн, в котором они обеспечивают преобразование оптического излучения в электронный сигнал с достаточной эффективностью. Обычно указывается спектральный интервал ($\lambda_{\text{н}}$, $\lambda_{\text{в}}$) или средняя длина волны λ_0 , при которых чувствительность фотоприемника близка к максимальной. Для наименьшей длины волны $\lambda_1 = 0,85$ мкм наиболее подходящим является приемник на основе кремния Si, имеющий чувствительность $\sim 0,5$ А/Вт в этом диапазоне. Для $\lambda_2 = 1,3$ мкм подходит приемник на основе Ge с чувствительностью ~ 1 А/Вт. И для $\lambda_3 = 1,55$ мкм часто используется InGaAs фотодиод, который может функционировать в широком спектральном диапазоне (0,9 – 1,6 мкм) с чувствительностью $\sim 1,1$ А/Вт.

Энергетические характеристики. К ним можно отнести прежде всего два важных параметра фотоприемника: минимальная принимаемая мощность P_{min} (в Вт или дБм) и шумовая эквивалентная мощность NEP [Вт/Гц^{1/2}]. Обычно, указывается один из этих параметров. И наиболее удобным является первый из них. Величины P_{min} для современных ВОСП находятся в диапазоне (-20дБм) – (-40дБм). Параметр NEP обычно имеет величины 10^{-10} – 10^{-12} Вт/Гц^{1/2}, если в нем учтены основные источника шума – тепловые и дробовые шумы фотоприемного устройства. Иногда производители приводят очень малый по величине $NEP = 10^{-15}$ Вт/Гц^{1/2}, характеризующий только дробовые шумы темного тока полупроводникового фотодиода. Использование такого

параметра для расчета ВОСП дает ошибочные результаты. В следующем параграфе будут представлены выражения, позволяющие рассчитать параметр P_{\min} по заданной величине NEP . В задачу данного этапа выполнения расчетного задания входит выбор фотоприемника нужного спектрального диапазона с минимальными значениями энергетических параметров ($P_{\min} \sim -40$ дБм, $NEP \sim 10^{-12}$ Вт/Гц^{1/2}).

Быстродействие фотоприемника. Этот параметр задается аналогично случаю источника света. Он характеризуется: 1) временем нарастания $\tau_{\text{нар}}$ [нс], 2) полосой модулирующих частот ΔF [МГц], 3) скоростью цифрового потока информации B [Мбит/с]. Для пересчета параметров во время нарастания можно воспользоваться формулами связывающими эти величины: $\tau_{\text{нар}} = 0,35/\Delta F$ или $\tau_{\text{нар}} = 0,35/B$ для аналоговых сигналов и ИКМ сигналов RZ типа; и $\tau_{\text{нар}} = 0,7/B$ для ИКМ сигналов NRZ типа.

2.3 Волоконные световоды для ВОСП

Прежде всего, необходимо выбрать тип волоконного световода для данного варианта расчета – одномодовый или многомодовый. Если непосредственно в данных это не указано, то выяснить тип световода можно по величине диаметра сердцевины. Для одномодового световода диаметр не превышает 10 мкм, для многомодового он составляет 50 – 100 мкм. Также выявляют тип световода технические данные его дисперсионных параметров. Для одномодовых световодов приводятся характеристики хроматической дисперсии, например, параметр хроматической дисперсии $M=17$ пс/(нм·км). Для многомодовых световодов указывается параметр широкополосности, например, $\Delta F = 1000$ МГц·км. Кроме того тип световода часто отмечается в сокращенных обозначениях: для одномодовых – OM BC или SMF (single mode fiber); для многомодовых световодов – MM BC или MMF (multimode fiber).

Спектральные характеристики волоконных световодов.

Производители указывают также рекомендуемые спектральные диапазоны

работы данного оптического волокна. Хотя по энергетическим параметрам волоконные световоды способны работать в любом из трех окон прозрачности с определенными коэффициентами оптических потерь, однако, с учетом параметров быстродействия производители выделяют лишь определенные спектральные области функционирования световодов. Так, часто многомодовые оптические волокна рекомендуют использовать в диапазонах длин волн 0,85 мкм и 1,3 мкм, в которых профиль показателя преломления обеспечивает наибольший коэффициент широкополосности (1000 МГц·км – 4000 МГц·км). В таком случае в технических параметрах волоконного световода приводятся коэффициенты широкополосности только для рекомендуемых спектральных диапазонов. Например, $\Delta F=1000$ МГц·км ($\lambda = 1300$ нм), $\Delta F = 600$ МГц·км ($\lambda = 850$ нм).

Для одномодовых световодов, как правило, указывается такой спектральный параметр как «длина волны отсечки» λ_c [нм]. Этот параметр разделяет области одномодового и многомодового режимов световода. При длине волны входного излучения $\lambda > \lambda_c$ данный световод будет обеспечивать одномодовый режим распространения. При длинах волн $\lambda < \lambda_c$ световод будет работать как многомодовый. Например, если указана $\lambda_c = 1260$ нм, то для входного излучения с $\lambda_1 = 1300$ нм или $\lambda_2 = 1550$ нм, световод является одномодовым. Но для излучения с $\lambda = 850$ нм данный одномодовый световод будет функционировать как многомодовый (точнее маломодовый).

К энергетическим параметрам волоконных световодов следует отнести коэффициент затухания [дБ/км], который зависит от выбранного спектрального диапазона. Например, для многомодового волоконного световода типа LUCENT Technologies 50/125 указаны параметры $\alpha = 2,4$ дБ/км ($\lambda = 850$ нм) и $\alpha = 0,5$ дБ/км ($\lambda = 1300$ нм). Отсутствие данных для третьего окна прозрачности для $\lambda = 1550$ нм, означает, что производитель **не рекомендует** использовать данное волокно в этом спектральном диапазоне.

Параметры быстрогодействия волоконных световодов. В данном случае речь идет о дисперсионных характеристиках волоконных световодов, таких как межмодовая, хроматическая и поляризационная дисперсии. Наиболее существенной является межмодовая дисперсия в многомодовых волоконных световодах. Самым распространенным способом она задается посредством параметра широкополосности ΔF [МГц·км], представляющим полосу пропускания световода длиной 1 км. Величина этого параметра зависит от спектрального диапазона, в котором используется данный световод и определяется профилем показателя преломления оптимизированным для выбранного окна прозрачности волокна. В зависимости от качества изготовления оптимального профиля (близкого к параболическому профилю) и условий возбуждения световода ΔF может изменяться в большом диапазоне от 200 МГц·км до 4700 МГц·км, что существенным образом влияет на результаты расчета быстрогодействия системы в целом. Этот факт говорит о необходимости тщательного выбора подходящего многомодового световода по данному параметру.

В одномодовых волоконных световодах механизм межмодовой дисперсии отсутствует и основной вклад в быстроедействие волокна вносится хроматической и поляризационной дисперсиями. Для расчета хроматической дисперсии необходимо определить «погонный» коэффициент дисперсии [пс/нм·км], который зависит от свойств материала сердцевины волокна и от формы профиля показателя преломления. В ряде случаев он представлен в данных производителя, например для «ступенчатого» профиля, в виде $M < 18$ пс/нм·км ($\lambda = 1550$ нм) и $M < 3,5$ пс/нм·км ($\lambda = 1300$ нм). Если эти параметры не указаны, то необходимо найти данные о длине волны нулевой дисперсии λ_0 и коэффициенте крутизны хроматической дисперсии M_0 [пс/нм²·км] для данного типа световода. Для одномодового волокна со ступенчатым профилем показателя преломления эти величины имеют типичные значения $M_0 = 0,1$ пс/нм²·км и $\lambda_0 = 1300$ нм. Знание этих величин позволяет рассчитать

коэффициент хроматической дисперсии M , что будет рассмотрено в следующем разделе. По известным коэффициентам M и ΔF находится время нарастания необходимое для расчета быстродействия системы.

В современных световодах вклад хроматической дисперсии может быть очень мал. Это возможно при работе с узкополосными источниками света, излучающими на длине волны λ близкой или равной длине волны нулевой дисперсии λ_0 одномодового волоконного световода. В таком случае целесообразно учесть поляризационную дисперсию одномодового световода и найти в данных изготовителя параметр этой дисперсии S [пс/км^{1/2}]. Этот параметр сильно зависит от качества изготовления световода и способа его прокладки. Для «хороших» волокон он может быть $S < 0,1$ пс/ км^{1/2}. Для «плохих» волокон возможны величины S порядка нескольких пс/ км^{1/2}, например $S < 5$ пс/ км^{1/2}. Знание этого параметра также позволяет определить вклад во время нарастания, определяемое поляризационной дисперсией. Необходимо отметить, что неопределенность условий эксплуатации ВОСП в целом, позволяет сделать только предварительные оценки вклада поляризационной дисперсии по величине параметра S (если он известен).

3. Энергетический расчет ВОСП

Ниже рассмотрен возможный порядок выполнения энергетических расчетов ВО систем «линия» и «звезда», условно разделенный на 12 этапов. Для иллюстрации энергетического расчета, на рисунках 2 и 3 приведены примеры структурных схем ВО систем «линия» и «звезда» с пояснением формирования потерь мощности и их учета на соответствующих этапах расчета.

Этап 1. На этом этапе уточняются, дополняются и приводятся данные из сформированного ранее технического задания и данных для выбранных элементов (источника света, фотоприемника, волоконного световода) необходимые для выполнения энергетического расчета:

- полоса частот или скорость передачи данных (этап 1А),
- величина отношения сигнал/шум SNR или вероятность ошибки BER (этап 1Б),
- тип кодирования цифровой информации (RZ или NRZ) и количество терминалов N (этап 1В),
- структура системы передачи данных («линия» или «звезда») и расстояниями между компонентами системы L_i (этап 1Г).

Эти данные определяют исходя из назначения и общих технических характеристик системы и могут быть изменены разработчиками с целью оптимизации системы.

Этап 2. На основе технических данных выбранного волоконного световода определяется погонное затухание (в дБ/км), зависящее от длины волны света и конструкции кабеля. Также определяется строительная длина (максимальная длина волоконного кабеля, выпускаемая производителем). Например, $\alpha = 2,2$ дБ/км ($\lambda = 0,85$ мкм), $L_c = 8,8$ км.

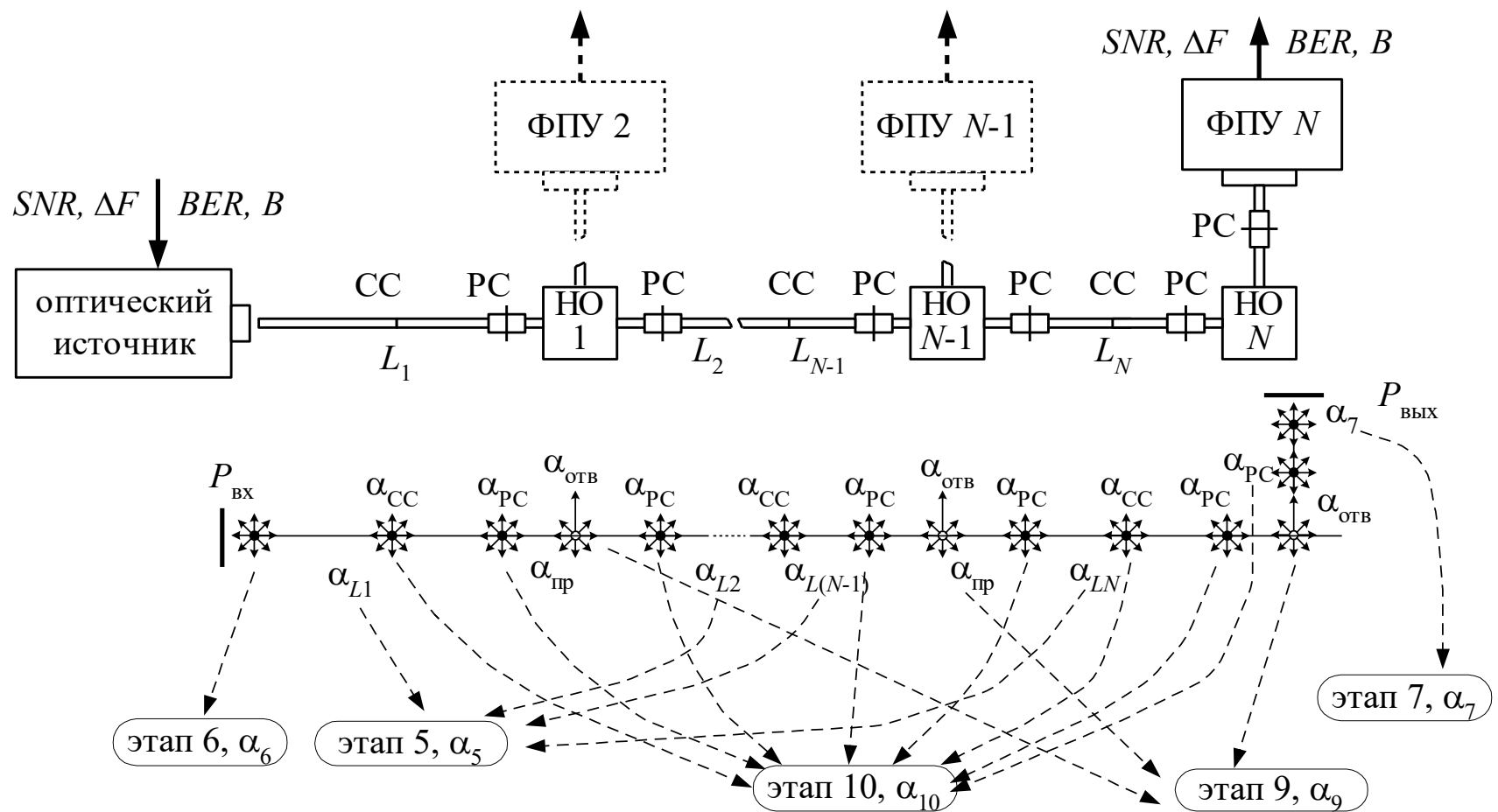


Рис. 2. Пример структурной схемы ВО системы "линия" с пояснительной диаграммой формирования потерь мощности и их учета на этапах энергетического расчета.

НО - направленный ответвитель
 ФПУ - фотоприемное устройство
 СС - сварное соединение
 РС - разъемное соединение

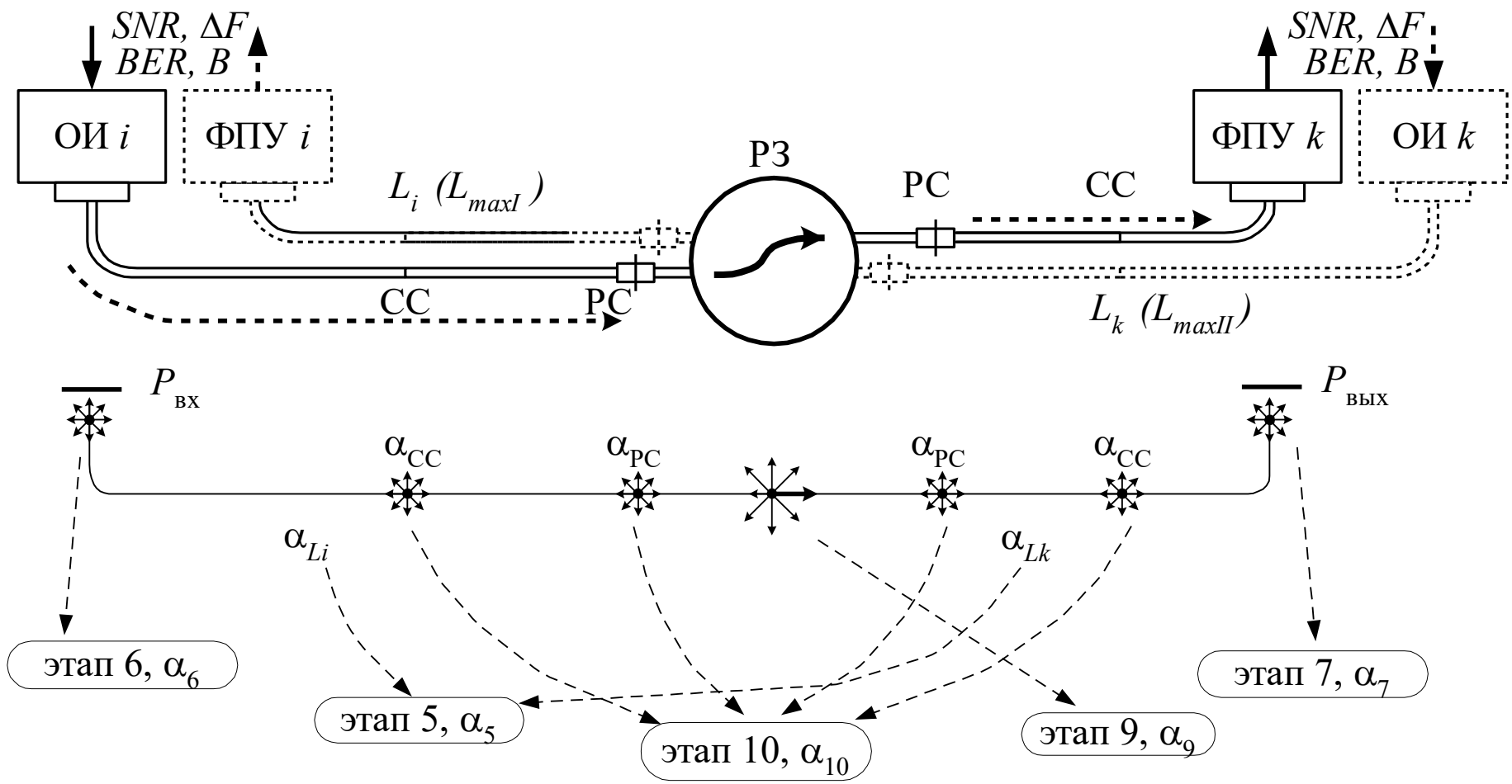


Рис. 3. Пример структурной схемы ВО системы "звезда" с пояснительной диаграммой формирования потерь мощности и их учета на этапах энергетического расчета. ОИ - оптический источник, СС - сварное соединение, РЗ - разветвитель "звезда", ФПУ - фотоприемное устройство, РС - разъемное соединение.

Этап 3. На основе технических данных выбранного источника света определяется величина мощности излучения в дБм (этап 3А):

$$P_{[\text{дБм}]} = 10 \lg(P_{[\text{мВт}]}) , P_{[\text{мВт}]} = 10^{(P_{[\text{дБм}]} / 10)} . \quad (1)$$

Так, например, значению «0 дБм» соответствует «1 мВт», «10 дБм» - «10 мВт», а «-20 дБм» - «0,01 мВт».

На этапе 3Б определяется значение средней мощности $P_{\text{ср}}$ (в дБм) излучения источника, зависящее от способа кодирования информации. При передаче аналогового сигнала или цифровой информации кодируемой методом с невозвращением в нуль (*NRZ*), средняя мощность на 3дБ меньше стандартной мощности источника, а при кодировании с возвращением в нуль (*RZ*) меньше на 6 дБ. Отметим, что весь энергетический расчет выполняется для средней мощности излучаемой источником света, соответствующей наиболее вероятному режиму работы.

Этап 4. На основе технических данных выбранного фотоприемника определяется его тип (pin-диод или лавинный фотодиод (ЛФД)) и спектральный диапазон работы (этап 4А), и определяются его технические параметры необходимые для энергетического расчета – полоса пропускания, шумовая эквивалентная мощность (*NEP*) или минимальная требуемая мощность (P_{min}), размер чувствительной площадки. Для выполнения дальнейших расчетов необходимо знание величины P_{min} . Часто производители приводят его значение в дБм единицах. Однако в ряде случаев указывается другой шумовой параметр фотоприемника т.н. NEP [Вт/Гц^{1/2}] или шумовая эквивалентная мощность.

Этап 4Б посвящен нахождению минимально допустимой усредненной оптической мощности P_{min} по заданной величине NEP . Этап 4Б энергетического расчета ВОСП является одним из наиболее сложных, как по физической сути, так и по достижению наибольшей корректности полученного результата. Строгое решение задачи нахождения P_{min}

определяется совокупностью многих параметров: видом кодирования сигналов, типом фотодиода, допустимыми отношением сигнал/шум или вероятностью ошибок, шириной полосы частот сигнала или скоростью передачи данных, емкостью и сопротивлением нагрузки фотодиода, характеристиками предусилителя фотоприемника и др.

Наиболее корректно можно определить минимальную требуемую мощность для **pin-фотодиодов** в случае преобладания тепловых шумов над другими видами шума (в основном, дробовыми шумами). Оценки показывают, что именно такая ситуация имеет место в большинстве вариантов волоконно-оптических систем связи.

Если известна рабочая полоса частот приемника ΔF_{np} (максимальная скорость передачи B_{np}) и значение NEP , то P_{min} можно оценить по формулам:

- для аналоговых фотоприемников

$$P_{\min[\text{Вт}]}^{pin} \approx NEP_{[\text{Вт}/\sqrt{\text{Гц}}]} \cdot \sqrt{\Delta F_{np} \cdot SNR}; \quad (2a)$$

$$P_{\min[\text{дБм}]}^{pin} \approx NEP_{[\text{дБм}/\sqrt{\text{Гц}}]} + 5 \lg(\Delta F_{np})_{[\text{дБ} \cdot \text{Гц}]} + 0,5 SNR_{[\text{дБ}]};$$

- для цифровых фотоприемников

$$P_{\min[\text{Вт}]}^{pin} \approx NEP_{[\text{ВВТ}/\sqrt{\text{Гц}}]} \cdot \sqrt{\Delta F_{np} \cdot SNR'}; \quad (2б)$$

$$P_{\min[\text{дБм}]}^{pin} \approx NEP_{[\text{дБм}/\sqrt{\text{Гц}}]} + 5 \lg(\Delta F_{np})_{[\text{дБ}/\text{Гц}]} + 0,5 SNR'_{[\text{дБ}]};$$

где величина SNR' - отношение сигнал/шум цифрового сигнала, обеспечивающее требуемое значение вероятности ошибки BER . Значение SNR' определяется известной зависимостью, приведенной на рисунке 4. Например, для достижения $BER = 10^{-8}$ требуется $SNR' = 21$ дБ, $BER = 10^{-9}$ - $SNR' = 21,6$ дБ, для получения $BER = 10^{-11}$ - $SNR' = 22,54$ дБ.

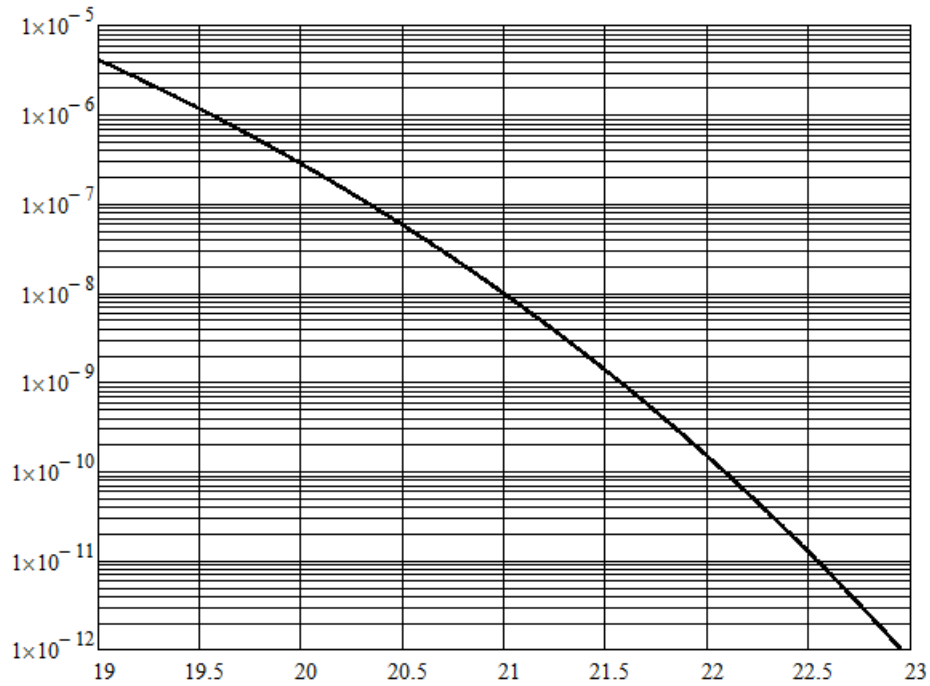


Рис. 4. Зависимость BER от отношения сигнал/шум (в дБ) для ИКМ сигналов.

Для фотоприемников цифровых линий передачи производители нередко указывают максимальную скорость передачи приемника B^{np} (Мбит/с) и непосредственно значение P_{min} при фиксированных значениях BER (чаще всего $BER=10^{-9}$ или $BER=10^{-11}$).

Если быстродействие фотоприемника представлено только значением времени нарастания τ (см. раздел «Расчет быстродействия»), то ΔF_{np} можно оценить с учетом соотношения $\Delta F_{np} = 0,35 / \tau_{нар}$.

Для лавинных фотоприемников разных типов (на основе Si, Ge, InGaAs) в общем случае нельзя привести простую рабочую формулу оценки P_{min} по представленной величине NEP . Сложность заключается в учете дополнительного вида шумов лавинного умножения, сильно зависящего от коэффициента лавинного усиления G и типа фотоприемника и приводящего к фактору шума G^{n-2} , где параметр $n = 2,3$ для Si, $n = 2,7$ для InGaAs и $n = 3$ для Ge фотодиодов. Из последних данных видно, что наименее шумящим является кремниевый фотоприемник, у которого шум-фактор может составлять ~ 5 при

коэффициенте усиления $G=100$. Однако, этот приемник имеет достаточную чувствительность ($0,5\text{А/Вт}$) только в первом окне прозрачности $\lambda=0,85$ мкм и его конкретные параметры G и n зависят от технологии изготовления лавинного диода. Исходя из вышеизложенного, можно рекомендовать для случая использования ЛФД находить приборы с заданным параметром P_{\min} .

Этап 4В. После определения минимально необходимой оптической мощности на выходе линии P_{\min} (дБм) можно определить величину допустимых потерь оптической мощности α_4 при распространении света от источника до приемника:

$$\alpha_{4,[\text{дБм}]} = P_{\text{вх},[\text{дБм}]} - P_{\text{мин},[\text{дБм}]} \quad (4)$$

Следующие этапы в энергетическом расчете связаны с учетом потерь в световодах, в устройствах стыковки и распределения, в кабельных соединениях.

Этап 5. На этапе 5 определяются потери в волоконных световодах. Для конфигурации типа «ЛИНИЯ» находятся суммарные потери α_5 в волокнах системы:

$$\alpha_{5,[\text{дБ}]} = \alpha_{\lambda} \cdot \sum_{i=1}^N L_i, \quad (5)$$

где α_{λ} - «погонные» потери в оптическом волокне в дБ/км на заданной длине волны λ , L_i - длина i -го участка между терминалами в км.

При проектировании системы связи данной конфигурации подразумевается, что расчеты проводятся для абонента, находящегося на наибольшем расстоянии от передающего терминала. Для других, менее удаленных от источника информации абонентов, условия качественной передачи информации будут заведомо выполняться.

При расчете оптической системы с конфигурацией типа «ЗВЕЗДА» учитываются потери α_5 в двух световодах общей длиной L_{max} , соединяющих два максимально разнесенных приемопередатчика распределительной звездообразной структуры:

$$\alpha_{5,[дБ]} = \alpha_\lambda \cdot L_{max}, \quad (6)$$

Как следует из сказанного, расстояние L_{max} равно сумме двух наибольших расстояний L_{maxI} и L_{maxII} между терминалами и центральным распределительным элементом. Это автоматически обеспечивает неискаженную передачу информации между другими, менее удаленными друг от друга абонентами.

Этап 6. На этапе 6 необходимо учесть потери α_6 при вводе излучения источника в световод. Эти потери возникают вследствие рассогласования по различным параметрам источников и оптических волокон (размеров сердцевины световода и активной площадки излучателя, числовой апертуры волокна и угловой расходимости излучения источника и, наконец, из-за френелевских отражений на поверхностях раздела сред) и могут достигать десятков децибел для полупроводниковых источников света. С целью уменьшения этих потерь могут использоваться согласующие оптические элементы: сферические и цилиндрические линзы, граданы и целые согласующие системы (каскад различных элементов). При этом потери снижаются до единиц дБ и менее. При отсутствии данной информации, для предварительных инженерных расчетов можно принять величину потерь при вводе в световод $\alpha_6 \approx 10$ дБ.

В настоящее время значительная часть промышленных полупроводниковых источников света (светодиоды, лазеры) производятся уже состыкованными с оптическим волокном (одномодовым или многомодовым). Тогда в технических характеристиках указываются: мощность на выходе

волокна, диаметр сердцевины d и числовая апертура NA , размер “модового пятна” и т.д. Выбрав такой источник, можно в расчетах положить $\alpha_6 = 0$ дБ.

Однако и в последнем случае могут возникнуть потери при стыковке с основным кабелем линии связи, если нарушены условия согласования двух световодов по диаметрам сердцевины и числовым апертурам. Так, если диаметр d_1 выходного волокна источника больше диаметра d_2 сердцевины световода в линии, то $\alpha_6 \neq 0$ и потери соединения оценивают по формуле:

$$\alpha_{6,[\text{дБ}]}^d = 10 \lg(d_1^2 / d_2^2), \quad \text{при } d_1 > d_2. \quad (7)$$

Аналогично учитываются потери при рассогласовании числовых апертур, если $NA_1 > NA_2$:

$$\alpha_{6,[\text{дБ}]}^{NA} = 10 \lg(NA_1^2 / NA_2^2), \quad \text{при } NA_1 > NA_2. \quad (8)$$

Полные потери соединения при несогласованных параметрах световодов находятся суммированием

$$\alpha_{6,[\text{дБ}]} = \alpha_{6,[\text{дБ}]}^d + \alpha_{6,[\text{дБ}]}^{NA}. \quad (9)$$

В случае если указанное рассогласование световодов отсутствует (например, световоды источника и линии одинаковы или согласованы по параметрам), то потери соединения будут незначительны, а его наличие можно учесть при расчетах на этапе 10.

Этап 7. На этом этапе необходимо учесть потери при стыковке световода с фотодетектором. Эти потери невелики и обычно считают $\alpha_7 = 1$ дБ. При выборе фотодиода надо обратить внимание на то, что диаметр фоточувствительной площадки должен быть больше диаметра сердцевины световода, поскольку обратное соотношение может привести к существенным потерям (выражение (7)).

Отметим, что в данном алгоритме расчета, потери света при стыковке с фотодетектором учитываются только единожды (для одного терминала)

независимо от конфигурации ВОСП («линия» и «звезда»), поскольку в обоих случаях расчет проводится для наихудших условий связи двух абонентов. Затраты мощности, связанные с передачей информации другим терминалам учитываются на этапе 9 при расчете потерь в схемах распределения данных.

Этап 8. На этапе 8А необходимо предусмотреть определенный допуск на потери, вызванные изменениями температуры окружающей среды. В некоторых внутриобъектовых применениях колебания температуры не превосходят номинальных значений, и запас по мощности делается небольшим, чтобы компенсировать изменения фоточувствительности детектора и мощности источника света. Однако, для большинства межобъектовых применений, колебания температуры являются существенным возмущающим фактором, особенно в тех случаях, когда в модулях источника и приемника не применяются схемы термостабилизации. Различные варианты учета температурных изменений окружающей среды представлены в таблице 1.

Таблица 1 Диапазон использования схемы термостабилизации

Использование схемы термостабилизации	Температурный интервал	Допуск на потери
Нет	Превышает 10 ⁰ С ÷30 ⁰ С	4 дБ
Нет	10 ⁰ С ÷30 ⁰ С	2 дБ
Да	Превышает 10 ⁰ С ÷30 ⁰ С	1 дБ
Да	10 ⁰ С ÷30 ⁰ С	0 дБ

На этапе 8Б учитываются потери, связанные с возможным ухудшением параметров элементов ВОСП со временем, в частности детекторов и источников излучения. В таблице 2 показаны допуски на потери, обусловленные возможным ухудшением параметров компонент (деградацией)

во времени в зависимости от комбинаций элементов источника излучения и фотоприемника (СИД – светоизлучающий диод, ЛД – лазерный диод, pin-ФД – pin-фотодиод, ЛФД – лавинный фотодиод).

Таблица 2 Допуск на потери в зависимости от состава

Элементный состав	Допуск на потери
СИД + pin ФД	2 дБ
СИД + ЛФД	3 дБ
ЛД + pin-ФД	4 дБ
ЛД + ЛФД	5 дБ

Этап 9. В рассматриваемых ВО системах следует учесть суммарные потери при прохождении сигналов через устройства распределения данных между терминалами.

Рассмотрим сначала вопрос формирования потерь в последовательной схеме распределения ВОСП типа «ЛИНИЯ». Потери в ней определяются свойствами направленных (X-образных) ответвителей, рис. 5.

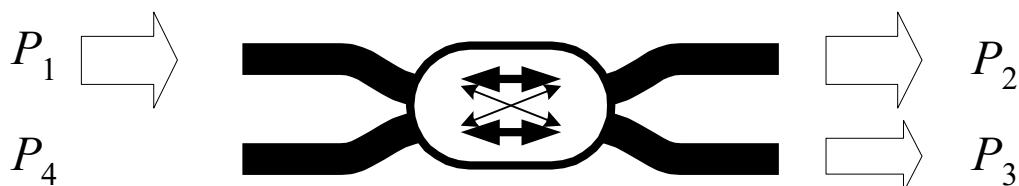


Рис. 5. Действие направленного ответвителя

Как отмечалось выше, в данной конфигурации проводится расчет полных потерь для самого удаленного от передатчика терминала (с номером N). В данном рассмотрении предполагается использование для распределения данных одинаковых направленных ответвителей. В этом случае полные потери α_n , связанные с прохождением направленных ответвителей определяются выражением:

$$\alpha_9 = (N - 1) \cdot \alpha_{np} + \alpha_{омв} , \quad (10)$$

где $\alpha_{np} = -10 \lg(P_2/P_1)$ - потери в ответвителе «на проход», $\alpha_{омв} = -10 \lg(P_3/P_1)$ - потери при ответвлении (рис. 6).

В величины α_{np} и $\alpha_{омв}$ входят потери, связанные с работой идеального ответвителя без потерь (когда $P_2 + P_3 = P_1$) и т.н. избыточные потери $\alpha_{изб}$

$$\alpha_{np} = \alpha_{np}^{ид} + \alpha_{изб} , \quad \alpha_{омв} = \alpha_{омв}^{ид} + \alpha_{изб} , \quad (11)$$

Величины потерь $\alpha_{np}^{ид}$ и $\alpha_{омв}^{ид}$ в идеальном ответвителе определяются коэффициентом деления $D = P_2/P_3$ или же коэффициентом ответвления P_3/P_1 . В таблице 3 указаны значения потерь направленных ответвителей для разных коэффициентов деления D при величине избыточных потерь $\alpha_{изб} = 1$ дБ.

Таблица 3 Зависимость потерь от ответвления

D	Ответвление	$\alpha_{омв}^{ид}$, дБ	$\alpha_{np}^{ид}$, дБ	$\alpha_{омв}$, дБ	α_{np} , дБ
1	50%	3,01	3,01	4,01	4,01
3	25%	6,02	1,25	7,02	2,25
9	10%	10	0,46	11	1,46
19	5%	13,01	0,22	14,01	1,22
99	1%	20	0,04	21	1,04

С учетом данных таблицы 3, выражения для оценки полных потерь распределения от числа терминалов N имеют вид (Рис.6):

$$\begin{aligned}
 D = 1: & \quad \alpha_9[\text{дБ}] = 4,01 \cdot N \\
 D = 3: & \quad \alpha_9[\text{дБ}] = 2,25 \cdot N + 4,77 \\
 D = 9: & \quad \alpha_9[\text{дБ}] = 1,46 \cdot N + 9,54 \\
 D = 19: & \quad \alpha_9[\text{дБ}] = 1,22 \cdot N + 12,79 \\
 D = 99: & \quad \alpha_9[\text{дБ}] = 1,04 \cdot N + 19,96
 \end{aligned} \quad (12)$$

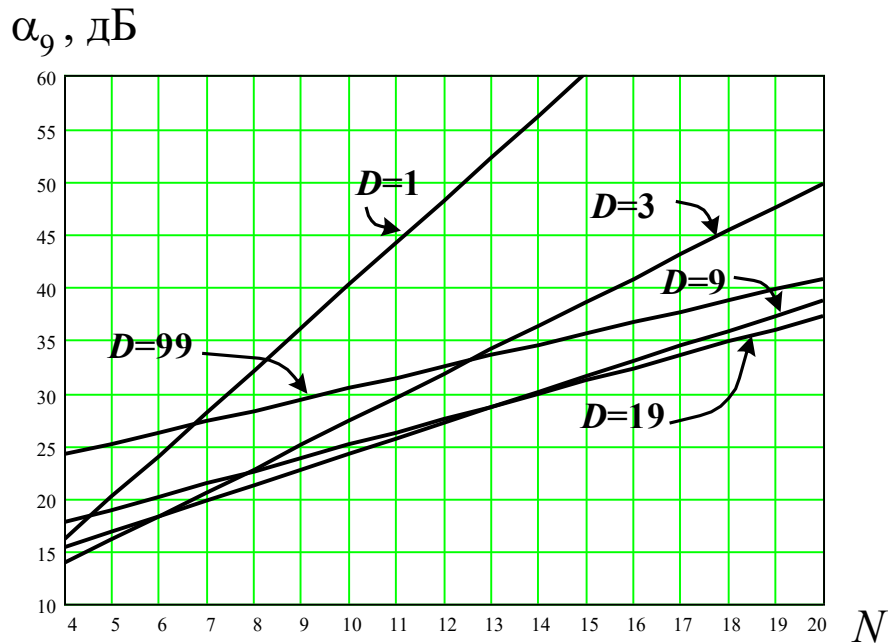


Рис.6. Зависимость потерь в системе распределения "линия" от числа абонентов для различных коэффициентов деления направленных ответвителей

Используя приведенные зависимости необходимо определить α_9 , выбрав оптимальное значение коэффициента деления D .

Кроме потерь непосредственно направленных ответвителей, надо учесть, что на практике они подключаются к системе через волоконные соединения (сварные или разъемные). Поэтому на этапе 10 следует учесть наличие между 1-м и N -м абонентами $2N$ кабельных соединений с направленными ответвителями.

Теперь рассмотрим распределение мощности в схеме типа «ЗВЕЗДА». Разветвитель типа «звезда» распределяет мощность поровну от каждого из N «входных» волоконных портов ко всем N «выходным» портам (рис.1,б).

Идеальный разветвитель «звезда», не имеющий внутренних потерь, вносит в сигнал между двумя терминалами потери, связанные с делением мощности между N абонентами, т.е. уменьшает мощность в N раз

$$\alpha_9^{ud} = 10 \lg(N). \quad (13)$$

Также следует учесть наличие избыточных потерь. В разветвителе «звезда», для значений N от 4 до 64, величина избыточных потерь может быть примерно оценена по формуле [2]

$$\alpha_{изб} = 2,5 \lg(N). \quad (14)$$

В результате потери мощности при прохождении разветвителя «звезда» оцениваются выражением:

$$\alpha_9 = 12,5 \lg(N). \quad (15)$$

Эта зависимость оценочных потерь в разветвителе «звезда» от N показана на рисунке 7 (для сравнения на рисунке также приведена зависимость (13) для идеального разветвления без избыточных потерь).

Отметим, что на практике, световодные линии подключаются к распределительному разветвителю через волоконное соединение. Поэтому на этапе 10 нужно учесть наличие двух волоконных соединений (сварных или разъемных) подключения к разветвителю.

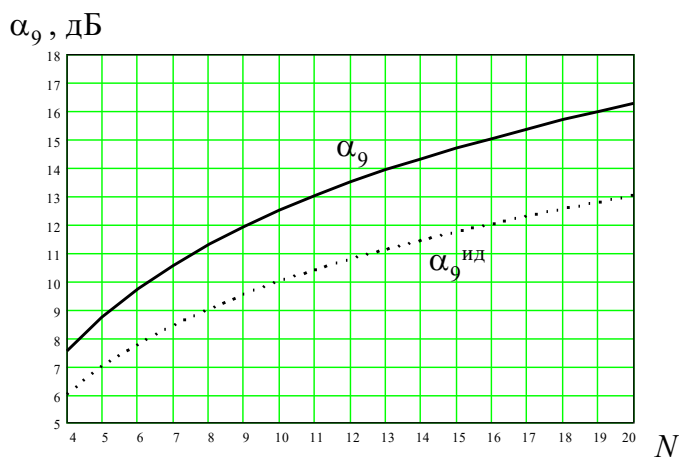


Рис. 7. Зависимость потерь в системе распределения "звезда" от числа абонентов (пунктиром показаны потери при идеальном разветвителе).

Этап 10. На этом этапе учитываются потери в кабельных соединениях, которые имеются в линии.

Разъемные или неразъемные кабельные соединения используются для подсоединения к разветвителям, оптическим источникам и приемникам. Кроме этого, необходимость дополнительных кабельных соединений

определяется максимальными длинами волоконных кабелей (т.н. «строительные» длины кабелей). В зависимости от типа кабеля (фирмы-изготовителя) эти длины меняются от единиц до десятков километров.

В подавляющем большинстве случаев, неразъемные соединения выполняются путем сварки волокон. В таблице 4 приведены краткие данные по ожидаемым потерям сварных соединений α_{CC} в зависимости от типа используемых световодов. Эти данные являются усредненными (ориентировочными) и могут быть скорректированы при уточненном проектировании.

При использовании в волоконно-оптической линии разъемов, в расчетах потерь мощности также необходимо учесть потери в разъемных соединениях. Для предварительной оценки потерь на разъемных соединениях α_{PC} можно воспользоваться данными таблицы 4.

Таблица 4. Зависимость потерь от типа световода

Тип световода	Типовые потери в разъемных соединениях	Типовые потери в неразъемном (сварном) соединении
Многомодовый	0,1 дБ	0,03 дБ
Одномодовый	0,2 дБ	0,05 дБ

Приведенные в таблице величины потерь соответствуют соединениям идентичных волокон. В противном случае необходимо учесть потери из-за рассогласования параметров световодов аналогично этапу 6 (выражения (8), (9), (10)).

Общие потери мощности α_{10} на соединениях находятся суммированием потерь на всех соединениях вдоль трассы, соединяющей максимально удаленных друг от друга абонентов ВОСП.

Этап 11. На этом этапе находим полное затухание в системе сложением всех приведенных выше потерь (в дБ)

$$\alpha_{11} = \alpha_5 + \alpha_6 + \alpha_7 + \alpha_{8A} + \alpha_{8B} + \alpha_9 + \alpha_{10}. \quad (16)$$

Этап 12. На этом заключительном этапе энергетического расчета можно сравнить полное затухание α_{11} с допустимыми потерями α_4

$$\alpha_{12} [\text{дБ}] = \alpha_4 [\text{дБ}] - \alpha_{11} [\text{дБ}]. \quad (17)$$

Условием того, что энергетический расчет ВОСП выполнен успешно, является положительный баланс

$$\alpha_{12} [\text{дБ}] > 0. \quad (18)$$

В этом случае в спроектированной схеме ВОСП обеспечиваются необходимые требования к отношению сигнал/шум (или вероятности ошибок) для заданной полосы сигналов (или быстродействия системы передачи) при условии достаточной широкополосности. Причем значение «запаса» α_{12} определяет потенциальные возможности наращивания системы (подключение дополнительных абонентов) или оптимизации системы (ослабление требований к элементам или увеличение длины участков линии). Если $\alpha_{12} < 0$, необходимо провести перерасчет, выбрав другие элементы с более подходящими параметрами (лазер с большей мощностью, волоконный кабель с меньшими потерями, более чувствительный фотоприемник и т.д.).

После удовлетворения условий энергетического баланса в системе, необходимо рассчитать быстродействие, чтобы определить, смогут ли выбранные компоненты обеспечить заданную скорость передачи или полосу частот сигнала.

4. Расчет быстродействия ВОСП

Расчет быстродействия, обеспечиваемого в системе, при выбранных элементах осуществляется, как и в случае энергетического расчета, для наиболее удаленного абонента от передатчика в системе «линия» или для двух наиболее удаленных друг от друга абонентов в системе «звезда». Для других вариантов условия передачи заведомо лучше.

В качестве основного параметра, характеризующего быстродействие или широкополосность, используется т.н. «время нарастания» τ . Это минимальное время, за которое значение сигнала изменяется от уровня 0,1 до уровня 0,9 относительно амплитуды сигнала. Это время связано с полосой частот и может быть оценено с использованием выражения

$$\tau = \frac{0,35}{\Delta f} . \quad (19)$$

Для цифрового сигнала с заданным значением B , время нарастания оценивается по выражению

$$\tau = \frac{0,7}{B} , \quad \text{для NRZ} \\ \tau = \frac{0,35}{B} , \quad \text{для RZ} . \quad (20)$$

Оптоволоконные элементы и вся система связи так же характеризуются временем нарастания. Если время нарастания сигнала, обеспечиваемое волоконной системой связи окажется больше времени нарастания исходного сигнала, то это может привести к частичной потере передаваемой информации (ограничению частотного диапазона сигнала и снижению SNR , увеличению BER и т.п.).

Ниже описан возможный порядок проведения расчета быстродействия волоконной системы связи, содержащий 9 этапов. На рисунке 8 показаны

структурные схемы систем «линия» и «звезда», поясняющие процесс расчета быстродействия волоконной системы связи.

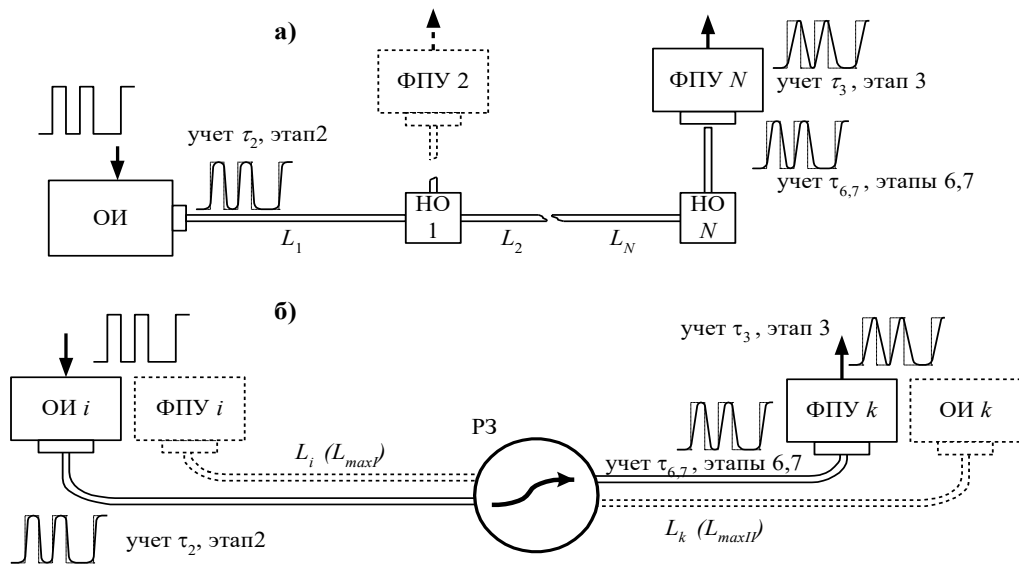


Рис.8. Расчет быстродействия.

а) структура системы "линия"; б) структура типа "звезда"

Этап 1. На первом этапе определяется допустимое значение времени нарастания τ_1 системы. Оно определяется параметрами передаваемого сигнала и оценивается по выражениям (19) или (20), в зависимости от типа сигнала.

Этап 2. На этом этапе определяется быстродействие источника света τ_2 , которое указывается производителем. Обычно указывают либо непосредственно значение времени нарастания, либо значение рабочей полосы частот модуляции. В последнем случае оценка τ_2 проводится по формуле (19). В расчетах следует использовать значение τ_2 , полученное из данных выбранного ранее оптического источника.

Этап 3. На этапе 3 аналогичным образом определяется быстродействие τ_3 выбранного фотоприемника.

Этап 4. На этапе 4 определяются параметры применяемого в системе волоконного световода, необходимые для расчета его быстродействия. К ним относятся: коэффициент преломления сердцевины n_1 , числовая апертура NA ,

структура профиля показателя преломления. Эти параметры находятся из справочных данных для выбранного световода.

Этап 5. На этом этапе необходимо задаться дополнительными данными об источнике света: длине волны λ и полуширине оптического спектра $\Delta\lambda$, которые необходимы для расчета быстродействия волоконного тракта, обусловленного хроматической дисперсией (на этапе 7).

Если спектральная ширина источника света не указана в его параметрах, то для предварительных оценок можно воспользоваться следующими типовыми значениями: $\Delta\lambda = 30$ нм – для СИД, $\Delta\lambda = 2$ нм – для многомодового лазерного диода с резонатором Фабри-Перо, и $\Delta\lambda = 0,1$ нм – для одночастотного лазерного диода (DFB или DBR лазеры и т.п.).

Этап 6. На этапе 6 выполняется расчет т.н. «межмодовой дисперсии», а точнее учитываются искажения сигнала, вызванные многомодовым распространением света в оптических волокнах. Будем рассматривать только градиентные световоды с параболическим профилем показателя преломления, обеспечивающие наибольшие частотные полосы (наибольшее быстродействие) передаваемых сигналов. Именно такие многомодовые световоды применяются в современных системах связи.

Как правило, для характеристики быстродействия световодов, в паспортных данных многомодовых градиентных световодов даются значения полосы пропускания информационных сигналов Δf в (МГц·км) для разных длин волн. В этом случае время нарастания τ_6 определяется по формуле

$$\tau_6 = \frac{0,35}{\Delta f} L . \quad (21)$$

Линейная зависимость времени нарастания сигнала τ_6 от длины световода L в приведенных выше выражениях справедлива лишь для многомодовых волокон, в которых моды распространяются независимо друг от друга, т.е. не взаимодействуют (для идеальных волокон без потерь). В реальных световодах

из-за наличия различных продольных нерегулярностей (изменения коэффициента преломления, диаметра, формы сердцевины, радиуса изгиба и др.) происходит обмен энергией между модами, что приводит к «выравниванию» их групповых задержек и уменьшению влияния межмодовой дисперсии. Как показывают эксперименты, существует некоторая критическая длина световода $L_{кр}$, называемая «равновесной» длиной, начиная с которой процессы взаимодействия приводят к равновесному устойчивому распределению амплитуд мод (энергии по модам), а τ_6 нарастает по закону $\sim L^{1/2}$.

Если эта длина $L_{кр}$ известна, то при $L < L_{кр}$ величину τ_6 следует оценивать по выражениям (21) или (22). При $L > L_{кр}$ следует использовать формулу

$$\tau_6 = \frac{0,35}{\Delta f} \sqrt{L \cdot L_{кр}} . \quad (22)$$

Длина $L_{кр}$ зависит от качества оптического волокна и может меняться от 1 км до 10-ков км (чем качественнее волокно, тем больше $L_{кр}$, тем меньше потери).

Если в паспортных данных величина $L_{кр}$ отсутствует, то расчет τ_6 проводится по формулам (21) с линейной зависимостью от L . Это несколько «завышает» оценку значения τ_6 , но гарантирует работоспособность системы по быстродействию.

Отметим, что при использовании формул (21) и (22) величина L определяется, как и в энергетическом расчете, суммой расстояний между терминалами в схеме «линия» и суммой двух максимальных расстояний между терминалами и разветвителем в схеме «звезда»

$$\begin{aligned} L &= \sum_{i=1}^N L_i \quad - \text{ " линия " } \\ L &= L_{max I} + L_{max II} \quad - \text{ " звезда " } \end{aligned} \quad (23)$$

При использовании выражений (22), для системы «линия», L так же определяется формулами (23). Однако для системы «звезда» следует учесть, что на выходе разветвителя в световоде может формироваться «неравновесный» модовый состав и формула (22) может дать «заниженную» оценку времени нарастания. Поэтому для системы звезда следует отдельно рассматривать два участка: L_{maxI} и L_{maxII} и, после оценки соответствующих времен нарастания τ_6^I и τ_6^{II} для этих участков, определять результирующее время нарастания

$$\tau_6 = \sqrt{(\tau_6^I)^2 + (\tau_6^{II})^2} \quad (24)$$

В случае, если в волоконном тракте применяются одномодовые световоды, очевидно, $\tau_6 = 0$.

Этап 7. На этапе 7 учитывается влияние хроматической дисперсия световода, имеющая две составляющие: материальную и волноводную дисперсии.

Материальная дисперсия связана со свойствами материала, в котором распространяется оптического излучение и выражается в зависимости коэффициента преломления вещества или волнового числа плоской монохроматической световой волны от оптической частоты источника (от длины волны источника в вакууме - λ). Волноводная дисперсия так же проявляется в зависимости эффективного коэффициента преломления или коэффициента распространения оптического излучения в световоде от длины волны источника. Но она вызвана не свойствами материала, а структурой оптического волновода: геометрическими параметрами и профилем показателя преломления волокна.

Явление дисперсии приводит к появлению разности времен задержек для волн, соответствующих разным λ в спектре излучения источника света и определяет время нарастания сигнала, передаваемого по световоду. Итоговое «уширение» короткого оптического импульса при прохождении волоконной

трассы, вызванное влиянием дисперсии, можно оценить, используя коэффициент дисперсии M (измеряемый обычно в $пс/(нм км)$):

$$\tau_7 = |M| \cdot L \cdot \Delta\lambda, \quad (25)$$

где L – длина волоконного тракта, задаваемая формулами (23), $\Delta\lambda$ – ширина (по уровню 3 дБ) оптического спектра источника. В выражении (25) используется абсолютная величина коэффициента дисперсии, поскольку он может быть как положительным, так и отрицательным (в зависимости от особенностей проявления эффекта дисперсии), что, однако, не влияет на знак времени нарастания.

Коэффициент хроматической дисперсии M определяется алгебраической суммой коэффициентов материальной дисперсии M_m и волноводной дисперсии M_w световода. На рисунке 9 показаны типичные зависимости коэффициента хроматической дисперсии от длины волны источника для трех различных профилей: ступенчатого (обычного), треугольного и W -образного. Характер профиля существенно влияет на область «нулевой» дисперсии λ_0 . Как видно из рисунка, ступенчатому профилю соответствует $\lambda_0 \approx 1300$ нм, треугольному профилю («дисперсионно-сдвинутое волокно», dispersion-shifted fiber) – $\lambda_0 \approx 1550$ нм, W -образному профилю («дисперсионно-уплощенное волокно», dispersion-flattened fiber) – растянутая область нулевой дисперсии. W -образный профиль иногда называют профилем с депрессированной оболочкой (depressed-cladding fiber).

Для расчетов необходимо определить значение коэффициента дисперсии по справочным данным выбранного световода. Производители, как правило, либо задают непосредственно значения коэффициента дисперсии M для нескольких рабочих длин волн, либо приводят выражения, позволяющие рассчитать M на рабочей длине волны. Для обычного (ступенчатого) одномодового световода чаще всего используется аппроксимация вида

$$M(\lambda) \approx \frac{M_0}{4} \left(\lambda - \frac{\lambda_0^4}{\lambda^3} \right), \quad (26)$$

где параметр M_0 , и длина волны «нулевой» дисперсии λ_0 указываются производителем в технических данных по волокнам. При отсутствии точных данных, для предварительных оценок коэффициента хроматической дисперсии в диапазоне длин волн $750 \div 1600$ нм, можно использовать аппроксимацию (26) приняв: $M_0 = 0,1$ пс/(нм² км) и $\lambda_0 = 1300$ нм.

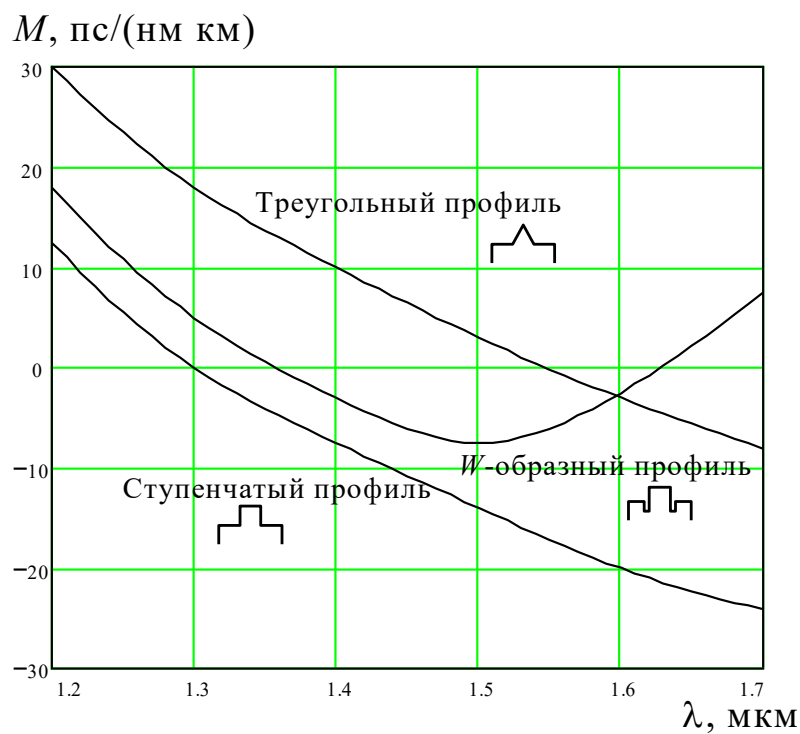


Рис. 9. Типовые зависимости коэффициента хроматической дисперсии от длины волны для световодов с различными структурами профиля показателя преломления.

После определения коэффициента хроматической дисперсии для выбранного световода, время нарастания τ_7 , ограниченное волоконным трактом оценивается по формуле (26).

Этап 8. На этапе 8 рассчитывается ожидаемое результирующее быстродействие всей системы

$$\tau_8 = \sqrt{\tau_2^2 + \tau_3^2 + \tau_6^2 + \tau_7^2} . \quad (27)$$

Этап 9. На этапе 9 определяется т.н. “бюджет” системы по быстродействию:

$$\tau_9 = \tau_1 - \tau_8 . \quad (28)$$

Если $\tau_9 > 0$, то выбранные оптические и оптоэлектронные элементы обеспечивают выполнение требований к ВОСП по быстродействию. Величина запаса по быстродействию τ_9 (в совокупности с запасом по мощности $P_{изб}$) показывает потенциальные возможности оптимизации системы, снижения требований к элементам или увеличения расстояний между абонентами. В случае $\tau_9 < 0$ необходимо повторить расчет системы, выбрав другие элементы и параметры схемы.

5. Примеры расчета ВОСП

Пример 1. Выполнить расчет волоконно-оптической системы передачи данных структуры «звезда» с равными длинами «радиусов» $L_i = 5$ км, числом терминалов $N = 8$, рабочей длиной волны $\lambda \approx 1300$ нм, многомодовым градиентным световодом и аналоговой модуляцией интенсивности. Ширина полосы передаваемых сигналов 7 МГц, отношение сигнал/шум 40 дБ. Температурный диапазон $10 \div 30^\circ\text{C}$ при наличии термостабилизации электронных элементов. Разветвитель соединен с основными световодами системы путем «сварки», а оптический источник и фотоприемник через оптический разъем.

Предварительный этап. Выбор основных элементов

А) В соответствие с заданием и указаниями пособия в разделе 2, выбран волоконный световод фирмы «Corning» 62,5/125. Данный световод рекомендуется использовать только в двух окнах прозрачности с центральными длинами волн $\lambda = 1300$ нм и $\lambda = 850$ нм. Первый случай с $\lambda = 1300$ нм является подходящим для данного расчетного задания.

Б) В качестве источника света выбран лазер фирмы «Hitachi», марка HL1326MF, работающий на длине волны $\lambda = 1310$ нм, обладающий достаточными мощностью и быстродействием $P_{\text{л}} = 5$ мВт, время нарастания 0,5 нс. Выбранный лазер не имеет оптического разъема или согласованного выводящего световода (pigtail).

В) Для данного варианта выбран фотоприемник PDA400 изготовления «THORLABS inc.», диапазон длин волн $\lambda = 800-1800$ нм, с pin-фотодиодом на основе InGaAs, со встроенным многомодовым волоконным световодом (полагаем использование градиентного волокна с $d = 62,5$ мкм), с общим динамическим диапазоном 90 дБ.

Энергетический расчет.

Этап 1. Приведем данные задания, необходимые для выполнения энергетического расчета:

- Требуемая полоса частот $\Delta F = 7$ МГц.
- Требуемое отношение сигнал/шум $SNR = 40$ дБ.
- Число терминалов $N = 8$.
- Схема распределения данных: «звезда», максимальное расстояние между терминалами $L_{maxI} + L_{maxII} = 2L_i = 10$ км.

Этап 2. Для выбранного градиентного многомодового волокна фирмы «Corning» 62,5/125 находим коэффициент затухания на рабочей длине волны ($\lambda = 1300$ нм), который составляет $\alpha_\lambda = 0,7$ дБ/км. Отметим рабочий температурный диапазон данного световода - $60 \div 85$ °С.

Этап 3А. Для выбранного источника света, лазер фирмы «Hitachi», марка HL1326MF, $\lambda = 1310$ нм, определяем мощность излучения в рабочем режиме $P_L = 5$ мВт. Пересчитываем в дБм: $P_{L,[дБм]} = 10 \lg(5) = 6,99$ дБм.

Этап 3Б. Средняя оптическая мощность, при аналоговой модуляции интенсивности в два раза меньше рабочей мощности лазера, $\alpha_{3б} = 3$ дБ, поэтому средняя мощность на входе в линию: $P_{вх} = P_L - \alpha_{3б} = 3,99$ дБм.

Этап 4А. Для выбранного фотоприемника, марки PDA400 «THORLABS inc.», определяем необходимые параметры: диапазон длин волн $\lambda = 800-1800$ нм, с pin-фотодиодом на основе InGaAs, со встроенным волоконным световодом (полагаем использование градиентного волокна с $d = 62,5$ мкм), с общим динамическим диапазоном 90 дБ. $NEP = 3 \cdot 10^{-12}$ Вт/(Гц)^{1/2}, полоса частот $\Delta F_{пр} = 10$ МГц.

Этап 4Б. Требуемая оптическая мощность в фотоприемнике оценивается из заданных параметров по выражению (2а)

$$P_{\min, [\text{дБм}]} = 10 \lg(NEP/10^{-3}) + 5 \lg(\Delta F_{np}) + 0,5 \cdot SNR = \\ = 10 \lg(3 \cdot 10^{-12} / 10^{-3}) + 5 \lg(10 \cdot 10^6) + 0,5 \cdot 40 = -30,23 \text{ дБм.}$$

Этап 4В. Величина допустимых потерь

$$\alpha_4 = P_{\text{ex}} - P_{\text{min}} = 3,99 \text{ дБм} - (-30,23 \text{ дБм}) = 34,22 \text{ дБ.}$$

Этап 5. Полные потери мощности в световоде

$$\alpha_5 = 2 \cdot L_i \cdot \alpha_\lambda = 2 \cdot 5 \text{ км} \cdot 0,7 \text{ дБ/км} = 7 \text{ дБ.}$$

Этап 6. Потери на ввод излучения из лазера в световод оценим в 10 дБ

$$\alpha_6 = 10 \text{ дБ.}$$

Этап 7. Потери при стыковке волокна с детектором не учитываем, поскольку фотоприемник имеет волоконный вход, с учетом чего заданы его параметры. Поэтому полагаем $\alpha_7 = 0$ дБ.

Этап 8. Допуск на изменения температуры при заданных условиях (диапазон $10 \div 40$ °С, есть термостабилизация электронных элементов) равен нулю: $\alpha_{9a} = 0$. Допуск на ухудшение параметров во времени (табл. 2) для сочетания элементов лазер + pin-фотодиод: $\alpha_{8b} = 4$ дБ. Общий дополнительный допуск по потерям $\alpha_8 = 4$ дБ.

Этап 9. Потери в схеме распределения данных типа «звезда» оцениваем по формуле (15):

$$\alpha_{10} = 12,5 \lg(N) = 12,5 \lg(8) = 11,29 \text{ дБ.}$$

Этап 10. В данной схеме кабельные соединения необходимы для подключения к разветвителю «звезда» (2 «сварных» стыка), а так же разъёмных соединений с источником и приемником. При этом полагаем, что все соединяемые волокна согласованы по апертуре и диаметру сердцевины. Кроме того, на трассе, соединяющей двух абонентов необходимы еще два

сварных соединения, поскольку длина $L_i = 5$ км превышает значение строительной длины световода (4,4 км).

В итоге, оптический сигнал проходит 4 неразъемных соединений "сварка", потери в которых составляют (см. таблица 4) $\alpha_{CC} = 0,03$ дБ и два разъемных соединения, с типовыми потерями $\alpha_{CP} = 0,1$ дБ. Общие потери в световодных соединениях оцениваются суммой

$$\alpha_{10} = 4\alpha_{CC} + 2\alpha_{PC} = 0,12 \text{ дБ} + 0,2 \text{ дБ} = 0,32 \text{ дБ}.$$

Этап 11. Суммарное затухание в системе:

$$\alpha_{11} = \alpha_5 + \alpha_6 + \alpha_7 + \alpha_8 + \alpha_9 + \alpha_{10} = 7 + 10 + 0 + 0,32 + 4 + 11,29 = 32,61 \text{ дБ}.$$

Этап 12. «Запас» по потерям

$$\alpha_{12} = \alpha_4 - \alpha_{11} = 34,22 \text{ дБ} - 32,61 \text{ дБ} = 1,61 \text{ дБ}.$$

Получив положительный баланс ($\alpha_{12} > 0$), считаем энергетический расчет данной системы выполненным успешно.

Расчет быстродействия.

Этап 1. Полное допустимое быстродействие системы при полосе передаваемого сигнала $\Delta F = 7$ МГц составляет $\tau_1 = 0,35/\Delta F = 50$ нс.

Этап 2. Время нарастания, обеспечиваемое источником HL1326MF, согласно техническим данным, равно $\tau_2 = 0,5$ нс.

Этап 3. Быстродействие фотоприемника PDA400 задано только номинальной полосой частот $\Delta F_{np} = 10$ МГц, поэтому время нарастания можно оценить по формуле $\tau_3 = 0,35/\Delta F_{np} = 35$ нс.

Этап 4. Для выбранного многомодового волоконного световода фирмы «CORNING» 62,5/125 быстродействие указано погонной полосой частот,

составляющей на рабочей длине волны $\Delta f = 500$ МГц·км, «критическая длина» не указана.

Этап 5. Спектральные параметры источника HL1326MF: рабочая длина волны $\lambda = 1310$ нм, ширина оптического спектра $\Delta\lambda = 2$ нм.

Этап 6. Ограничение быстродействия, определяемое модовой дисперсией световода оценивается по выражению

$$\tau_6 = 0,35 \cdot L / \Delta f = 0,35 \cdot 2L_i / \Delta f = 7 \text{ нс.}$$

Этап 7. В приложении параметры для оценки коэффициента хроматической дисперсии не указаны. Поэтому воспользуемся формулой (26), где $\lambda_0 = 1300$ нм, $M_0 = 0,1$ пс/(нм² км). Тогда значение коэффициента хроматической дисперсии составит:

$$M(\lambda = 1310 \text{ нм}) = (0,1/4) (1310 - 1300^4/1310^3) = 0,99 \text{ пс/(нм км)}.$$

Ограничение быстродействия системы, обусловленное хроматической дисперсией световода, в соответствие с (25), имеет величину

$$\tau_7 = M \Delta\lambda L = 0,99 \text{ пс/(нм км)} \cdot 2 \text{ нм} \cdot 10 \text{ км} = 0,02 \text{ нс.}$$

Этап 8. Результирующее быстродействие всей системы

$$\tau_8 = \sqrt{\tau_2^2 + \tau_3^2 + \tau_6^2 + \tau_7^2} = \sqrt{0,5^2 + 35^2 + 7^2 + 0,02^2} = 35,7 \text{ нс.}$$

Этап 9. Баланс системы по быстродействию:

$$\tau_9 = \tau_l - \tau_8 = 50 \text{ нс} - 35,7 \text{ нс} = 14,3 \text{ нс.}$$

Требования к ВОСП по быстродействию обеспечиваются. Причем из сделанных численных оценок видно, что в рассматриваемой системе основным ограничивающим фактором является быстродействие фотоприемника, которого, однако, вполне достаточно для передачи сигнала с заданной полосой.

В результате, приближенный расчет показывает работоспособность ВОСП с заданными параметрами и выбранными элементами.

Пример 2. Выполнить расчет волоконно-оптической системы распределения цифровой информации конфигурации «линия» со следующими параметрами: рабочая длина волны 1,55 мкм, одномодовый световод, способ кодирования: ИКМ - NRZ, скорость передачи информации 100Мбит/с (10^8 бит/с), 7 абонентов, вероятность ошибки $BER=10^{-9}$, расстояние между абонентами 5 км, диапазон температур $10\div 30$ °С (имеется термо-стабилизация электронных элементов системы), ответвители подключены к линии посредством сварки, источник и приемники подсоединяются через волоконно-оптические разъемы.

Предварительный этап. Выбор основных элементов

А) В соответствие с заданием и указаниями пособия в разделе 2, выбираем одномодовый световод SMF-28 фирмы «Corning». Указанная длина волны отсечки $\lambda_{отс}=1260$ нм определяет возможность одномодового режима распространения света только во втором и третьем окнах прозрачности ($\lambda=1300$ нм и $\lambda=1550$ нм). Т.о. данный световод может быть применен для работы с заданной длины волны света $\lambda=1550$ мкм.

Б) Выбираем п/п лазер производства «Mitsubishi», марка FU-68SDF-2/22, $\lambda=1550$ нм, рабочая мощность в выходном световоде $P_{л}=6$ мВт, быстродействие характеризуется временем нарастания 0,15 нс. Лазер имеет выходной одномодовый волоконный световод (pigtail 10/125).

В) Выбираем фотоприемник для цифровых волоконных линий на базе pin-фотодиода, фирма изготовитель «Mitsubishi», марка MF-156DS-R13 с номинальным быстродействием $B_{np}=155$ Мбит/с. Диапазон длин волн

$\lambda = 1260-1580$ нм, с pin-фотодиодом на основе InGaAs, со встроенным одномодовым волоконным световодом 10/125.

Энергетический расчет.

Этап 1. Приведем данные задания, необходимые для выполнения энергетического расчета:

- Скорость передачи NRZ сигналов – 100 Мб/с.
- Допустимая вероятность ошибки $BER=10^{-9}$.
- Число терминалов $N = 7$.
- Схема распределения данных: «линия», расстояние между терминалами $L_i = 5$ км.
- диапазон температур $10 \div 30$ °С (имеется термо-стабилизация электронных элементов системы),
- ответвители подключены к линии посредством сварки, источник и приемники подсоединяются через волоконно-оптические разъемы.

Этап 2. Для выбранного одномодового световода SMF-28 фирмы «Corning». находим коэффициент затухания на рабочей длине волны ($\lambda = 1550$ нм), который составляет $\alpha_\lambda \leq 0,3$ дБ/км. Отметим рабочий температурный диапазон данного световода - $60 \div 85$ °С. Строительная длина данного волокна $2,2 \div 25,2$ км

Этап 3А. Выбранный п/п лазер производства «Mitsubishi», марка FU-68SDF-2/22, $\lambda = 1550$ нм, имеет рабочую мощность в выходном световоде $P_{\text{л}} = 6$ мВт. Пересчитываем величину мощности в дБм: $P_{\text{л, [дБм]}} = 10 \lg(6) = 7,78$ дБм.

Этап 3Б. При цифровой передаче сигналов с NRZ учитываем, что средняя мощность в 2 раза (на 3 дБ) ниже рабочей мощности лазера: $\alpha_{3б} = 3$ дБ. В результате средняя мощность излучения на входе линии:

$$P_{ex,[дБм]} = P_{Лex,[дБм]} - \alpha_{3б} = 7,78 \text{ дБм} - 3 \text{ дБ} = 4,78 \text{ дБм}.$$

Этап 4А. Для выбранного фотоприемника марки MF-156DS-R13 определяем необходимые параметры: диапазон длин волн $\lambda = 1260\text{-}1580$ нм, встроенный одномодовый волоконный световод, минимальная принимаемая мощность $P_{мин} = -36$ дБм, максимальная скорость цифрового потока (RZ) $B = 155$ Мбит/с.

Этап 4Б. Минимальная требуемая оптическая мощность в фотоприемнике указана производителем $P_{мин} = -36$ дБм.

Этап 4В. Величина допустимых потерь

$$\alpha_4 = P_{ex} - P_{min} = 4,78 \text{ дБм} - (-36 \text{ дБм}) = 40,78 \text{ дБ}.$$

Этап 5. Полные потери мощности в световоде:

$$\alpha_5 = N \cdot L_i \cdot \alpha_\lambda = 7 \cdot 5 \text{ км} \cdot 0,3 \text{ дБ/км} = 10,5 \text{ дБ}.$$

Этап 6. Потери на ввод излучения из лазера в световод не учитываем, поскольку рабочая мощность задана в выходном световоде. $\alpha_6 = 0$ дБ.

Этап 7. Потери при стыковке волокна с детектором так же не учитываются, поскольку фотоприемник имеет волоконный вход, для которого задана минимальная необходимая мощность. $\alpha_7 = 0$ дБ.

Этап 8. Допуск по потерям на температурные изменения для заданных условий (диапазон $10 \div 30$ °С и есть схема термостабилизации) равен нулю: $\alpha_{8a} = 0$ дБ. Допуск на ухудшение параметров во времени (таблица 2) для сочетания элементов лазер + pin-фотодиод: $\alpha_{8б} = 4$ дБ. Общий дополнительный допуск по потерям $\alpha_8 = 4$ дБ.

Этап 9. Потери мощности в схеме распределения данных конфигурации «линия» определяются параметрами X-разветвителей. Выбираем разветвители

с коэффициентом деления $D = 3$. Тогда, согласно (12), оценка потерь в схеме распределения составляет

$$\alpha_9 = 2,25 \cdot N + 4,77 = 2,25 \cdot 7 + 4,77 = 20,52 \text{ дБ.}$$

Этап 10. Кабельные соединения возникают в результате использования в схеме «линия» N разветвителей, каждый из которых вносит 2 стыка, а так же разъемных соединений с источником и приемником. При этом полагаем, что все соединяемые одномодовые волокна хорошо согласованы по апертуре и поперечному диаметру поля моды. Других соединений в данном случае не требуется, поскольку строительные длины для кабеля SMF-28 значительно превосходят $L_{i \max} = L_i = 5$ км.

По условию, для подсоединения ответвителей применены неразъемные соединения "сварка", типовые потери в которых составляют (см. табл.4) $\alpha_{CC} = 0,05$ дБ. Суммарные потери на $2N$ сварных соединениях имеют величину $\alpha_{8CC} = 2N \cdot \alpha_{CC} = 2 \cdot 7 \cdot 0,05$ дБ = 0,7 дБ. Потери на двух разъемных световодных соединениях с источником и приемником составят (таблица 4) $\alpha_{10PC} = 2 \cdot \alpha_{PC} = 2 \cdot 0,2$ дБ = 0,4 дБ.

Общие потери в световодных соединениях оцениваются суммой

$$\alpha_{10} = \alpha_{CC} + \alpha_{PC} = 0,7 \text{ дБ} + 0,4 \text{ дБ} = 1,1 \text{ дБ.}$$

Этап 11. Суммарное затухание в системе:

$$\alpha_{11} = \alpha_5 + \alpha_6 + \alpha_7 + \alpha_8 + \alpha_9 + \alpha_{10} = 10,5 + 0 + 0 + 20,52 + 4 + 1,1 = 36,12 \text{ дБ.}$$

Этап 12. «Запас» по потерям

$$\alpha_{12} = \alpha_4 - \alpha_{11} = 37,78 \text{ дБ} - 36,12 \text{ дБ} = 1,66 \text{ дБ.}$$

Получив положительный баланс ($\alpha_{12} > 0$), считаем энергетический расчет данной системы выполненным успешно.

Расчет быстродействия.

Этап 1. Полное допустимое время нарастания системы для RZ сигналов при скорости передачи $B = 100$ Мбит/с составляет $\tau_1 = 0,35/B = 3,5$ нс.

Этап 2. Время нарастания, обеспечиваемое источником FU-68SDF-2/22, согласно техническим данным, равно $\tau_2 = 0,15$ нс.

Этап 3. Быстродействие фотоприемника MF-156DS-R13 задано только номинальной скоростью передачи данных $B_{np} = 155$ Мбит/с. Оценка времени нарастания составляет $\tau_3 = 0,35/B_{np} = 2,258$ нс.

Этап 4. Параметры волоконного световода SMF-28, определяющие быстродействие - это указанные изготовителем параметры аппроксимирующего выражения (27) : $M_0 = 0,092$ пс/(нм² км), $\lambda_0 = 1312$ нм.

Этап 5. Спектральные параметры источника FU-68SDF-2/22: длина волны $\lambda = 1550$ нм, ширина спектра $\Delta\lambda < 0,2$ нм.

Этап 6. Величина $\tau_6 = 0$, т.к. применяется одномодовый световод.

Этап 7. Согласно технической информации производителя световода SMF-28, оценка коэффициента хроматической дисперсии выполняется по формуле (27), где $\lambda_0 = 1312$ нм, $M_0 = 0,092$ пс/(нм² км). Тогда значение коэффициента хроматической дисперсии составит:

$$M(\lambda = 1550 \text{ нм}) = (0,092/4) (1550 - 1312^4/1550^3) = 17,35 \text{ пс/(нм км)}.$$

Ограничение быстродействия системы, обусловленное хроматической дисперсией световода, в соответствие с (26), имеет величину

$$\tau_7 = M \Delta\lambda L = 17,35 \text{ пс/(нм км)} \cdot 0,2 \text{ нм} \cdot 7,5 \text{ км} = 0,12 \text{ нс}.$$

Этап 8. Результирующее быстродействие всей системы

$$\tau_8 = \sqrt{\tau_2^2 + \tau_3^2 + \tau_6^2 + \tau_7^2} = \sqrt{0,15^2 + 2,258^2 + 0 + 0,12^2} = 2,265 \text{ нс}.$$

Этап 9. Баланс системы по быстродействию:

$$\tau_9 = \tau_1 - \tau_8 = 3,5 \text{ нс} - 2,265 \text{ нс} = 1,235 \text{ нс}.$$

Требования к ВОСП по быстродействию обеспечиваются. Причем из сделанных численных оценок видно, что в рассматриваемой системе основным ограничивающим фактором является быстродействие фотоприемника, которого, однако, достаточно для требуемой скорости передачи информации.

В результате, приближенный расчет показывает работоспособность ВОСП с заданными параметрами и выбранными элементами.

Пример 3. Выполнить расчет волоконно-оптической системы распределения цифровой информации конфигурации «линия» со следующими параметрами: рабочая длина волны 0,85 мкм, многомодовый световод, способ кодирования: ИКМ - RZ, скорость передачи информации 210 Мбит/с, 5 абонентов, вероятность ошибки $BER=10^{-9}$, расстояние между абонентами 0,5 км, диапазон температур $10\div 30$ °С (термо-стабилизация электронных элементов системы отсутствует), волоконные Y-ответвители подключены к линии посредством сварки, источник и приемники подсоединяются через волоконно-оптические разъемы.

Предварительный этап. Выбор основных элементов

А) В соответствие с заданием и указаниями пособия в разделе 2, выбираем многомодовый световод фирмы «Corning» 50/125. Световод имеет диаметр сердцевины $d=50$ мкм, числовую апертуру $NA= 0,2$, максимальную строительную длину 4,4 км.

Б) Выбираем п/п лазер производства «Mitsubishi», марка FU-23LD, $\lambda = 850$ нм, рабочая мощность $P_{л} = 4$ мВт, быстродействие характеризуется временем нарастания 0,4 нс. Лазер имеет выходной многомодовый волоконный световод (pigtail 50/125).

В) Выбираем фотоприемник для цифровых волоконных линий на базе Si pin-фотодиода, THORLABS марка FDS010 с временем нарастания 1 нс при нагрузке 50 Ом. Рабочая длина волны $\lambda = 850$ нм, чувствительность на этой

длине волны 0,3 А/Вт и $NEP = 1,2 \cdot 10^{-12}$ Вт/ $\sqrt{\text{Гц}}$. Диаметр чувствительной зоны 1 мм.

Энергетический расчет.

Этап 1. Приведем данные задания, необходимые для выполнения энергетического расчета:

- Скорость передачи RZ сигналов – 210 Мбит/с.
- Допустимая вероятность ошибки $BER=10^{-9}$.
- Число терминалов $N = 5$.
- Схема распределения данных: «линия», расстояние между терминалами $L_i = 0,5$ км.
- диапазон температур $10 \div 30$ °С (есть термо-стабилизация оптоэлектронных элементов системы),
- ответвители подключены к линии посредством сварки, источник и приемники подсоединяются через волоконно-оптические разъемы.

Этап 2. Для выбранного многомодового световода Corning 50/125 находим коэффициент затухания на рабочей длине волны ($\lambda = 850$ нм), который составляет $\alpha_\lambda \leq 2,5$ дБ/км. Отметим рабочий температурный диапазон данного световода - $60 \div 85$ °С. Строительная длина данного волокна 4,4 км.

Этап 3А. Выбранный п/п лазер производства «Mitsubishi», марка FU-23LD, $\lambda = 850$ нм, имеет рабочую мощность в выходном световоде $P_L = 4$ мВт. Пересчитываем величину мощности в дБм: $P_{L, [\text{дБм}]} = 10 \lg(4) = 6,02$ дБм.

Этап 3Б. При цифровой передаче сигналов с RZ-кодированием учитываем, что средняя мощность в 4 раза (на 6 дБ) ниже рабочей мощности лазера: $\alpha_{3б} = 6$ дБ. В результате средняя мощность излучения на входе линии:

$$P_{\text{вх}, [\text{дБм}]} = P_{L \text{ вх}, [\text{дБм}]} - \alpha_{3б} = 6,02 \text{ дБм} - 6 \text{ дБ} = 0,02 \text{ дБм.}$$

Этап 4А. Для выбранного фотоприемника THORLABS FDS010 определяем необходимые параметры: рабочая длина волны $\lambda = 850$ нм, время нарастания 1 нс, диаметр чувствительной площадки 1 мм.

Этап 4Б. Требуемая оптическая мощность в фотоприемнике оценивается из заданных параметров по выражению (2а)

$$\begin{aligned} P_{\min, [\text{дБм}]} &= 10 \lg(NEP / 10^{-3}) + 5 \lg(\Delta F_{np}) + 0,5 \cdot SNR = \\ &= 10 \lg(1,2 \cdot 10^{-12} / 10^{-3}) + 5 \lg(350 \cdot 10^6) + 0,5 \cdot 21,6 = -35,7 \text{ дБм}. \end{aligned}$$

Здесь использованы данные $\Delta F_{np} = 350$ МГц ($\tau_{нар} = 1$ нс), $SNR = 21,6$ дБ ($BER = 10^{-9}$).

Этап 4В. Величина допустимых потерь

$$\alpha_4 = P_{ex} - P_{min} = 0,02 \text{ дБм} - (-35,7 \text{ дБм}) = 35,72 \text{ дБ}.$$

Этап 5. Полные потери мощности в световоде:

$$\alpha_5 = N \cdot L_i \cdot \alpha_\lambda = 5 \cdot 0,5 \text{ км} \cdot 2,5 \text{ дБ/км} = 6,25 \text{ дБ}.$$

Этап 6. Потери на ввод излучения из лазера в световод не учитываем, поскольку рабочая мощность задана в выходном световоде. $\alpha_6 = 0$ дБ.

Этап 7. Учитываем потери при стыковке волокна с детектором при отсутствии pigtail

$$\alpha_7 = 1 \text{ дБ}.$$

Этап 8. Допуск по потерям на температурные изменения для заданных условий (диапазон $10 \div 30^\circ\text{C}$ и есть схема термостабилизации) равен нулю: $\alpha_{8a} = 0$ дБ. Допуск на ухудшение параметров во времени (таблица 2) для сочетания элементов лазер + pin-фотодиод: $\alpha_{8b} = 4$ дБ. Общий дополнительный допуск по потерям $\alpha_8 = 4$ дБ.

Этап 9. Потери мощности в схеме распределения данных конфигурации «линия» определяются параметрами X-разветвителей. Выбираем разветвители

с коэффициентом деления $D = 3$. Тогда, согласно (12), оценка потерь в схеме распределения составляет

$$\alpha_9 = 2,25 \cdot 5 + 4,77 = 16,02 \text{ дБ.}$$

Этап 10. Кабельные соединения возникают в результате использования в схеме «линия» N разветвителей, каждый из которых вносит 2 стыка, а так же разъемных соединений с источником и приемником. При этом полагаем, что все соединяемые одномодовые волокна хорошо согласованы по апертуре и поперечному диаметру поля моды. Других соединений в данном случае не требуется, поскольку строительные длины для кабеля SMF-28 значительно превосходят $L_{i \max} = L_i = 0,5$ км.

По условию, для подсоединения ответвителей применены неразъемные соединения "сварка", типовые потери в которых составляют (см. табл.4) $\alpha_{CC} = 0,05$ дБ. Суммарные потери на $2N$ сварных соединениях имеют величину $\alpha_{8CC} = 2N \cdot \alpha_{CC} = 2 \cdot 5 \cdot 0,05 \text{ дБ} = 0,5 \text{ дБ}$. Потери на двух разъемных световодных соединениях с источником и приемником составят (таблица 4) $\alpha_{10PC} = 2 \cdot \alpha_{PC} = 2 \cdot 0,1 \text{ дБ} = 0,2 \text{ дБ}$.

Общие потери в световодных соединениях оцениваются суммой

$$\alpha_{10} = \alpha_{CC} + \alpha_{PC} = 0,5 \text{ дБ} + 0,2 \text{ дБ} = 0,7 \text{ дБ.}$$

Этап 11. Суммарное затухание в системе:

$$\alpha_{11} = \alpha_5 + \alpha_6 + \alpha_7 + \alpha_8 + \alpha_9 + \alpha_{10} = 6,25 + 0 + 1 + 16,02 + 4 + 0,5 = 27,77 \text{ дБ.}$$

Этап 12. «Запас» по потерям

$$\alpha_{12} = \alpha_4 - \alpha_{11} = 35,72 \text{ дБ} - 27,77 \text{ дБ} = 7,95 \text{ дБ.}$$

Получив положительный баланс ($\alpha_{12} > 0$), считаем энергетический расчет данной системы выполненным успешно.

Расчет быстродействия.

Этап 1. Полное допустимое время нарастания системы для RZ сигналов при скорости передачи $B = 210$ Мбит/с составляет $\tau_1 = 0,35/B = 1,7$ нс.

Этап 2. Время нарастания, обеспечиваемое источником «Mitsubishi», марка FU-23LD, согласно техническим данным, равно $\tau_2 = 0,4$ нс.

Этап 3. Быстродействие фотоприемника THORLABS FDS010 задано временем нарастания $\tau_3 = 1$ нс.

Этап 4. Параметры волоконного световода Corning 50/125, определяющие быстродействие - это указанные изготовителем параметры погонной полосы пропускания 600 МГц·км .

Этап 5. Спектральные параметры источника FU-23LD: длина волны $\lambda = 850$ нм, ширина спектра $\Delta\lambda = 2$ нм.

Этап 6. Ограничение быстродействия, определяемое модовой дисперсией световода оценивается по выражению

$$\tau_6 = 0,35 \cdot L / \Delta f = 0,35 \cdot N L_i / \Delta f = 0,35 \cdot 5 \cdot 0,5 / 600 \cdot 10^6 = 1,46 \text{ нс.}$$

Этап 7. Оценка коэффициента хроматической дисперсии выполняется по формуле (27), где $\lambda_0 = 1300$ нм, $M_0 = 0,092$ пс/(нм² км). Тогда значение коэффициента хроматической дисперсии составит:

$$M(\lambda = 850 \text{ нм}) = (0,092/4) (850 - 1300^4/850^3) = -87,42 \text{ пс/(нм км)}.$$

Ограничение быстродействия системы, обусловленное хроматической дисперсией световода, в соответствии с (26), имеет величину

$$\tau_7 = M \Delta\lambda L = 87,42 \text{ пс/(нм км)} \cdot 2 \text{ нм} \cdot 5 \cdot 0,5 \text{ км} = 437,1 \text{ пс} = 0,437 \text{ нс.}$$

Этап 8. Результирующее быстродействие всей системы

$$\tau_8 = \sqrt{\tau_2^2 + \tau_3^2 + \tau_6^2 + \tau_7^2} = \sqrt{0,4^2 + 1^2 + 2,92^2 + 0,437^2} = 3,14 \text{ нс.}$$

Этап 9. Баланс системы по быстродействию:

$$\tau_9 = \tau_1 - \tau_8 = 3,33 \text{ нс} - 3,14 \text{ нс} = 0,19 \text{ нс.}$$

Требования к ВОСП по быстродействию обеспечиваются. Причем из сделанных численных оценок видно, что в рассматриваемой системе основным ограничивающим фактором является быстродействие многомодового волоконного световода.

В результате, приближенный расчет показывает работоспособность ВОСП с заданными параметрами и выбранными элементами.

6. Приложения

В приложениях приводятся краткие данные о параметрах, выпускаемых в настоящее время источников оптического излучения (приложение 1), фотоприемников (приложение 2) и волоконных световодов (приложение 3). Указанные характеристики дополнительно иллюстрируют материал, изложенный в данном пособии, а так же могут служить в качестве данных для учебных заданий по расчету ВОСП.

Приведенная информация предназначена для учебных целей, содержит примеры волоконно-оптических элементов разного назначения и стоимости.

Кроме основных характеристик элементов, непосредственно задействованных в расчете ВОСП, в столбце дополнительных данных приводятся некоторые другие указанные производителем данные, или условия для которых заданы основные параметры.

Для компактности представленного материала, был использован ряд сокращений, специальных терминов и обозначений, которые, по возможности, совпадают с соответствующими сокращениями и обозначениями в основном тексте пособия. Но, для определенности, они расшифрованы в конце каждого приложения.

Как и в основном материале пособия, некоторые распространенные общепринятые «англоязычные» термины и обозначения, в случае, если это представлялось целесообразным, были оставлены без перевода.

Приложение 1. Источники оптического излучения для ВОСП

Источники на базе полупроводниковых лазерных диодов.

Параметры Фирма/модель	Мощность $P_{л}$, мВт	Длина волны λ , нм	Ширина спектра $\Delta\lambda$, нм	Быстродействие B ΔF τ Мбит/с МГц нс	Дополнительные данные
mitsubishi electric FU-68SDF-2/21/22 ¹⁾	6 ²⁾	1550	<0,2 ³⁾	2500/3500/ 0,15	MQW DFB, $I_{II} = 12$ мА, $K=0,15$ Вт/А, ОИ, TC, pigtail SMF 10/125, $-20 \div 65$ °C
mitsubishi electric ML 776H11F	6	1310	-	- / - / 0,2	InGaAsP MQW DFB, $I_{II} = 10$ мА, $-40 \div 85$ °C
mitsubishi electric MF-622DF-T12-450	2dBm ²⁾	1300, 1550	1 ⁴⁾	622 / - / -	InGaAsP, $I_{II} = 14$ мА, $K=0,06$ Вт/А TC, pigtail SMF 10/125, $-20 \div 65$ °C
mitsubishi electric FU-45DF-38	6 ²⁾	1310	-	- / 2000 / -	InGaAsP DFB, $I_{II}=15$ мА, $RIN=-155$ дБ/Гц, TC, $K=0,2$ Вт/А, pigtail SMF 10/125, $-20 \div 65$ °C
mitsubishi electric MF-156DF-T12-290 ¹⁾	2dBm ²⁾	1300, 1550	1 ⁴⁾	155 / - / -	InGaAsP, $I_{II} = 14$ мА, $K=0,06$ Вт/А TC, pigtail SMF 10/125, $-20 \div 65$ °C
mitsubishi electric FU-65SDF-3	4 ²⁾	1550	-	- / 2000 / 0,15	InGaAsP DFB, $I_{II}=12$ мА, $RIN=-155$ дБ/Гц, TC, $K=0,1$ Вт/А, pigtail SMF 10/125, $-20 \div 65$ °C
mitsubishi electric FU-23LD	4 ²⁾	850	-	- / - / 0,4	AlGaAsP, $I_{II}=16$ мА, TC, $K=0,2$ Вт/А, pigtail MMF 50/125 $NA=0,2$, $-20 \div 65$ °C
HITACHI HL1326MF	5	1310	2 ⁴⁾	- / - / 0,5	InGaAsP MQW FP, $I_{II}=16$ мА, $K=0,25$ Вт/А, $-40 \div 85$ °C
JDSU 850nm 10G TOSA	0,5 ²⁾	850	0,4 ³⁾	10000/ - / -	VCSEL, TOSA – оптический разъем.
OPTOCOM COR. 850nm VCSEL 1.25G	0,5 ²⁾	850	0,4 ⁴⁾	1250/- / -	VCSEL, TOSA – оптический разъем (Transmit optical sub-assembly).

Источники на базе светодиодов.

Параметры Фирма/модель	Мощность $P_{л}, мВт$	Длина волны $\lambda, нм$	Ширина спектра $\Delta\lambda, нм$	Быстродействие $B \quad \Delta F \quad \quad \tau$ $Мбит/с МГц нс$	Дополнительные данные
MITSUBISHI ELECTRIC FU-23LE	0,065 ²⁾	840	45	- / 30 / -	AlGaAs/Ga, $K=0,9Вт/А$, pigtail MMF 50/125, $-20\div65\text{ }^{\circ}C$
MITSUBISHI ELECTRIC FU-34LE ¹⁾	0,015 ²⁾	1300	130	- / 150 / -	InGaAsP/InP, $K=0,9Вт/А$, pigtail MMF 50/125, $-20\div65\text{ }^{\circ}C$

1) - Оптический источник предназначен для передачи цифровой информации.

2) - Оптическая мощность в выходном световоде.

3) - Ширина оптического спектра по уровню -20 дБ.

4) – «RMS ширина» оптического спектра ($\Delta\lambda = \sqrt{\sum A_i (\lambda_i - \lambda_0)^2 / \sum A_i}$, где λ_i и A_i длины волн мод и их уровни, относительно основной с длиной волны λ_0).

В столбце дополнительных данных использованы следующие сокращения и обозначения:

- MQW - Multiple Quantum Well Laser - лазер со структурой на «квантовых ямах».

- DFB - Distributed Feedback Structure - лазер с распределенной обратной связью.

- FP – Fabry-Perot Laser - лазер с резонатором Фабри-Перо.

- ОИ – встроенный оптический изолятор .

- ТС – встроенные элементы термостабилизации.

- $I_{п}$ – пороговый ток лазерного излучателя, [мА].

- K – коэффициент преобразования излучателя: отношение выходной оптической мощности к току инжекции, [Вт/А].

- Pigtail – широко распространенный термин, обозначающий волоконный вывод оптоэлектронного модуля.

- SMF (MMF) – стандартная аббревиатура для одномодового (многомодового) оптического волокна.

- RIN – Relative intensity noise – относительный спектральный уровень флуктуаций мощности источника, [дБ/Гц].

Приложение 2. Фотоприемники для ВОСП

Фотоприемники на базе pin-фотодиодов.

Параметры Фирма/модель	Диапазон длин волн λ , нм	Быстродействие B ΔF τ Мбит/с МГц нс	Диаметр площадки D , мм	NEP P_{min} Вт/(Гц) ^{1/2} дБм	Дополнительные данные
NEW FOCUS, Inc Photodetector 1801	850	- / 200 / 3	0,3	$30 \cdot 10^{-12}$ / -	Si-diode, $K = 2,4 \cdot 10^4$ В/Вт, (ВО разъем)
NEW FOCUS, Inc Photodetector 1811	1200 - 1600	- / 200 / 3	0,3	$22,5 \cdot 10^{-12}$ / -	InGaAs, $K = 2,4 \cdot 10^4$ В/Вт, (ВО разъем)
NEW FOCUS, Inc Photodetector 1514	950 - 1650	- / 6000 / 0,07	0,025	$15 \cdot 10^{-12}$ / -	InGaAs/Шотки, $K = 250$ В/Вт ВО разъем,
ALPHALAS UPD-40-IR2-FC	800 - 1700	- / 8500 / 0,04	0,02	$1,1 \cdot 10^{-15}$ / -	InGaAs, Pigtail 9 μ m <i>FC/APC, SMA</i>
ALPHALAS UPD-300-UP	170-1100	- / 1000 / 0,3	0,6	$3 \cdot 10^{-15}$ / -	Si, Polished window, BNC
MITSUBISHI ELECTRIC MF-156DS-R13-17 ^{1) 2)}	1260–1580	155 / - / -	-	- / -36	Pigtail S(M)MF 9,5 ³⁾ (50)/125, <i>NRZ-testing</i>
MITSUBISHI ELECTRIC MF-622DS-R13-24 ^{1) 2)}	1260–1580	622 / - / -	-	- / -33	Pigtail S(M)MF 9,5 ³⁾ (50)/125, <i>NRZ-testing</i>
MITSUBISHI ELECTRIC MF-32DF-R03 ^{1), 2)}	850 ²⁾	32 / - / -	-	- / -32	<i>NRZ, BER= 10⁻⁹, Si,</i> ВО разъем, 0÷50 °C
THORLABS, FDS010	200 - 1100	- / - / 1	1,0	$1,2 \cdot 10^{-13}$ / -	Si, window, $I_D=1$ nA

Фотоприемники на базе лавинных фотодиодов.

Фирма/модель	Параметры	Диапазон длин волн λ , нм	Быстродействие B ΔF τ Мбит/с МГц нс	Диаметр площадки D , мм	NEP P_{min} Вт/(Гц) ^{1/2} дБм	Дополнительные данные
MITSUBISHI ELECTRIC FU-319SPA-C6		1000–1600	2500 / >1800 / -	-	- / -33	$BER=10^{-10}$, Pigtail SMF 9,5 ³⁾ /125, NRZ-testing, -40 ÷ 85 °C
MITSUBISHI ELECTRIC MF-2500DS-R14-170 ^{1) 2)}		1280–1335 ²⁾	2500 / - / -	-	- / -29	Pigtail SMF 10/125, NRZ-testing, -40 ÷ 85 °C
MITSUBISHI ELECTRIC MF-156DS-TR124-002 ^{1) 2)}		1285–1335 ²⁾	155 / - / -	-	- / -37	Ge, $BER = 10^{-9}$, Pigtail: S(M)MF, NRZ-testing
MITSUBISHI ELECTRIC MF-622DS-R14-003 ²⁾		1260-1580 ²⁾	622 / - / -	-	- / -33	InGaAs, $BER = 10^{-9}$, 0 ÷ 55 °C Pigtail: S(M)MF, NRZ-testing

1) - Фотоприемник предназначен для передачи цифровой информации.

2) - Фотоприемник входит в состав приемо-передающего модуля или предназначен для работы в комплекте с определенным модулем оптического источника. Указан диапазон длин волн соответствующего источника излучения.

3) – Указан диаметр модового пятна (MFD - mode-Field diameter) в [мкм].

В столбце дополнительных данных использованы следующие сокращения и обозначения:

- K – коэффициент преобразования фотоприемника: отношение выходного напряжения к входной оптической мощности, [В/Вт].
- N – динамический диапазон фотоприемника, [дБ]. Через дробь указаны: величина для линейного режима и предельная величина динамического диапазона.
- Pigtail – широко распространенный термин, обозначающий волоконный вывод оптоэлектронного модуля.
- SMF (MMF) – стандартная аббревиатура для одномодового (многомодового) оптического волокна.
- R – относительный уровень обратных отражений от фотоприемника, [дБ].
- ВО – волоконно-оптический.

Приложение 3. Волоконные световоды для ВОСП

Параметры Фирма/модель	Затухание α , дБ/км для λ , нм 850/1300/1550	Диаметр сердцевины d , мкм	Числовая апертура NA	Коэфф. дисперсии $M, \frac{пс}{нм \cdot км}$	Полоса пропускания Δf , МГц/км	Дополнительные данные
Alcatel, Multimode fiber 6930, 50/125 fiber	2,4 / 0,6/-	50	0,2	- -	600 ($\lambda = 850$ нм) 1200 ($\lambda = 1300$ нм)	$L_C = 1,1 - 8,8$ км, -60÷85 ⁰ С
Alcatel, Multimode fiber 6932, 62.5/125 fiber	2,8 / 0,8/-	62,5	0,275	- -	250 ($\lambda = 850$ нм) 800 ($\lambda = 1300$ нм)	$L_C = 2,2 - 8,8$ км, -60÷85 ⁰ С
CORNING, SMF-28	- / 0,4/0,3	10	MFD(9/10)	Аппроксимация (27) $M_0 = 0,092$ пс/(нм ² км), $\lambda_0 = 1312$ нм		$L_C = 2,2 - 25,2$ км, -60÷85 ⁰ С, $\lambda_{отс} = 1260$ нм
OFS LaserWave 550 Laser-Optimized OM4 Fiber	2,3 / 0,6 / -	50	0,20	Laser EMB@850 nm – 4700 MHz/km Laser EMB @1300 nm – 500 MHz/km		$L_C = 2,2 - 8,8$ км, $d = 50/125/245$ мкм
OFS LaserWave 300, Laser-Optimized OM3 Fiber	2,3 / 0,6 / -	50	0,20	Laser EMB@850 nm – 2000 MHz/km Laser EMB @1300 nm – 500 MHz/km		$L_C = 2,2 - 8,8$ км, $d = 50/125/245$ мкм
SEDI Fibres Optiques P 3000	- / 0,33 / 0,18	10	MFD(8.4/9)	<3,5 ($\lambda = 1300$ нм) < 18 ($\lambda = 1550$ нм)	- -	$L_C = 4,4 - 25$ км, -60÷85 ⁰ С, $\lambda_{отс} = 1250$ нм

¹⁾ и ²⁾ - Диаметр модового пятна (MFD - mode-Field diameter) в [мкм] для $\lambda = 1300$ и 1550 мкм соответственно.

- L_C - «строительные» длины [км], - $d_{вн}$ - внешний диаметр световода [мкм].

- $\lambda_{отс}$ - длина волны «отсечки» [мкм],

- EMB – Effective Modal Bandwidth.

Приложение 4. Шумовые параметры фотоприемников: «Минимальная требуемая мощность» и «Эквивалентная шумовая мощность»

1. Фотоприемники на основе pin-фотодиодов

1.1. Отношение сигнал/шум и минимальная требуемая мощность.

При проектировании информационных оптических систем часто возникает задача расчета достижимого отношения сигнал/шум. Особенно актуальна эта проблема в волоконно-оптических системах связи, оптических сенсорных системах, оптических устройствах обработки информации. Имеется много литературных данных по этим вопросам [5, 6, 7, 8, 9]. Однако, следует отметить, что эти данные часто бывают противоречивы, недостаточно ясно изложены, рассмотрены только некоторые частные случаи. Затруднения вызывают также необходимые расчеты требуемых величин (P_{\min} , NEP, SNR) по ограниченным данным о параметрах фотоприемных устройств. Все это позволяет заключить о целесообразности данного рассмотрения.

Прежде всего, отметим, что в целом затронутая тема относится к проблеме приема оптических сигналов. И в рамках данного анализа будем рассматривать только метод прямого детектирования. Т.е. будет рассматриваться отношение электрической мощности полезного информационного сигнала к электрической мощности шумов на нагрузке фотодиодного приемника или эквивалентное ему отношение квадратов электрических токов сигнала и шума. Эта задача многократно рассматривалась в литературе [1-3] и искомое выражение можно представить в виде:

$$SNR = \frac{(s \cdot P)^2}{2e\Delta f(sP + I_D) + 4\Delta f(kT/R)} \quad (1)$$

где P – мощность оптического сигнала (Вт), s – чувствительность фотодиодного приемника (А/Вт), e – заряд электрона (Кулон), Δf – полоса

частот приемника (Гц), k – постоянная Больцмана (Джоуль/градус), R – сопротивление нагрузки (Ом), I_D – темновой ток (А), T – температура (К)

Можно выделить в выражении (1) два вида параметров – **электрические и оптические**. К оптическим параметрам относится мощность оптического сигнала P . Все остальные параметры можно отнести к электрическим – R , Δf , I_D , e , SNR . Последний параметр (SNR) отнесен к электрическим, поскольку представляет отношение электрических мощностей. Отметим также, что чувствительность приемника s является параметром связи оптических и электрических величин. Именно двойственная природа параметров в выражении (1) определяет основные особенности оптических методов приема.

Попытаемся пояснить последнее утверждение. Для получателя информации переданной по оптической системе наиболее важными являются электрические сигналы с учетом электрических шумов. Именно поэтому в (1) рассматривается отношение электрических мощностей сигнала и шума. С другой стороны энергетический расчет оптической схемы осуществляется только с учетом оптических сигналов – мощности излучения лазера, оптических потерь в световодах и соединителях, оптической мощности необходимой для фотоприемника и т.п. Для «сшивания» этих двух типов сигналов и разработаны некоторые эквивалентные параметры, позволяющие учесть и оптические характеристики оптоэлектронной системы и требования к электрическим сигналам. Такими параметрами являются – эквивалентная шумовая мощность (NEP) и минимальная требуемая оптическая мощность P_{min} . Далее мы представим определения этих величин, их физическое содержание и возможные способы их оценки для разных вариантов фотоприемников.

Выражение (1) позволяет найти отношение сигнал/шум (электрические величины, после фотодетектирования) при известных величинах, стоящих в правой стороне. Однако, это выражение позволяет рассмотреть и другую задачу. А именно, по заданному отношению сигнал/шум SNR определить

оптическую мощность P , при которой это отношение выполняется. В таком случае из (1) легко получить уравнение для нахождения P :

$$P^2 - P \cdot (SNR \cdot \Delta f) \frac{2e}{s} - (SNR \cdot \Delta f) \frac{2e}{s^2} \cdot I_D - (SNR \cdot \Delta f) \frac{4kT}{s^2 \cdot R} = 0, \quad (2)$$

Выражение (2) является квадратным уравнением относительно оптической мощности P . Из этого уравнение можно найти интересующие нас параметры NEP и P_{min} . Для этого запишем хорошо известное решение уравнения (2):

$$P = (SNR \cdot \Delta f) \frac{e}{s} + \sqrt{\left((SNR \cdot \Delta f) \frac{e}{s} \right)^2 + (SNR \cdot \Delta f) \left(\frac{2e}{s^2} \cdot I_D + \frac{4kT}{s^2 \cdot R} \right)}, \quad (3)$$

Выражение (3) определяет величину оптической мощности, при которой выполняется заданное отношение электрических мощностей сигнала к шуму SNR в заданной полосе приемника Δf и других известных параметрах s , R , T , I_D . Целесообразнее всего из (3) найти минимальную требуемую оптическую мощность P_{min} , обеспечивающую данные SNR и Δf . Рассчитанная из (3) зависимость P_{min} от произведения $(SNR \cdot \Delta f)$ показана на рис.1 для типичных параметров pin-фотоприемника – $R=50$ Ом, $T=300$ К, $I_D=1$ нА, $s=1$ А/Вт.

Как видно на рис.1, в практически значимом диапазоне значений $(SNR \cdot \Delta f)$ вплоть до 10^{13} Гц, минимальная требуемая мощности P_{min} определяется в основном тепловыми шумами. Те же данные в линейном масштабе представлены на рис.2. На нем ясно видно, что при оптической мощности $P=10$ мкВт происходит выравнивание вкладов тепловых и дробовых шумов для случая $(SNR \cdot \Delta f) \approx 10^{13}$ Гц. Выше этой точки преобладают дробовые шумы и рост мощности от аргумента $(SNR \cdot \Delta f)$ происходит по линейному закону. В противоположном случае при $P < 10$ мкВт и $(SNR \cdot \Delta f) < 10^{13}$ Гц данная зависимость близка к квадратному корню $(SNR \cdot \Delta f)^{0.5}$.

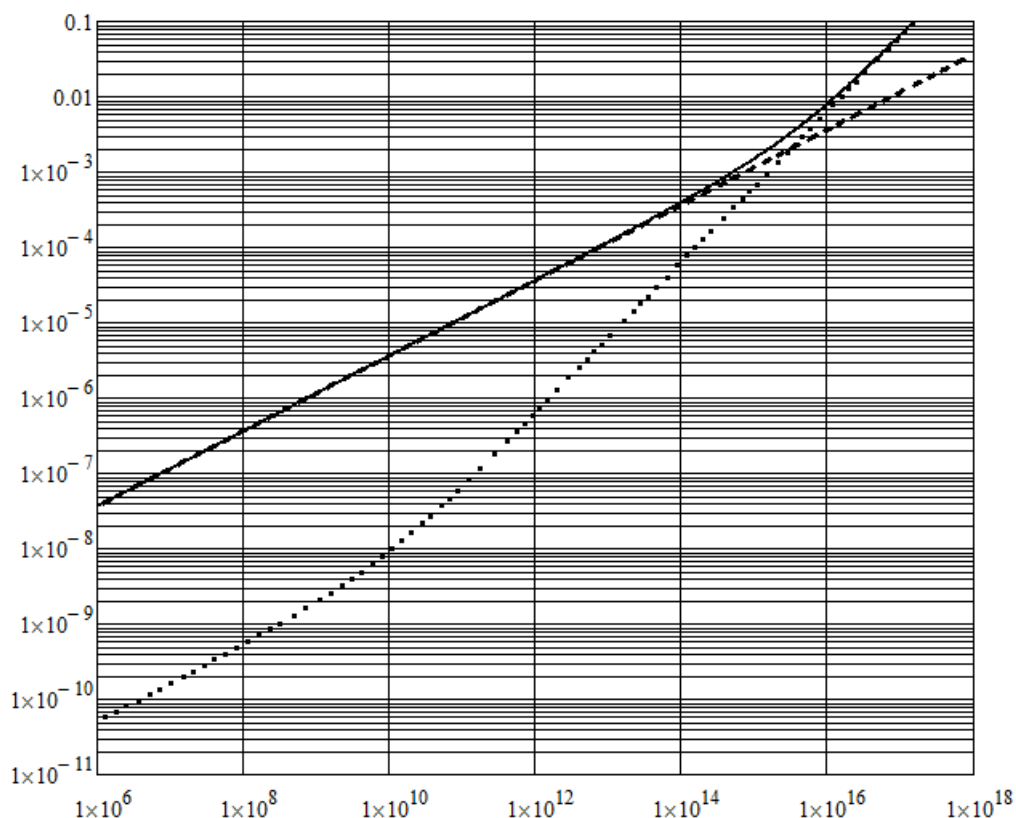


Рис.1. Зависимости минимальной требуемой мощности P_{min} (Вт) от произведения отношения сигнал/шум на полосу пропускания ($SNR \cdot \Delta f$) (Гц) для p-i-n фотодиода в логарифмическом масштабе. Верхняя кривая – полное решение уравнения (2). Нижняя кривая – решение (2) в дробовом пределе, при учете только дробовых шумов. Средняя кривая – решение (2) при учете только тепловых шумов.

Отметим некоторые особенности зависимостей на рис. 1-2. Результирующую зависимость P_{min} от ($SNR \cdot \Delta f$) можно разбить на три участка:

1) Первый участок, определяемый тепловыми шумами, находится в области малых величин произведения ($SNR \cdot \Delta f$). Здесь можно пренебречь влиянием дробовых шумов и применять упрощенные выражения для расчета P_{min} (см. далее выражение (4)).

2) Второй участок, определяется только дробовыми шумами оптического сигнала и соответствует большим величинам ($SNR \cdot \Delta f$). Фактически этот участок относится к случаю квантового предела, когда можно пренебречь тепловыми шумами и дробовыми шумами темнового тока (см. далее выражение (6)).

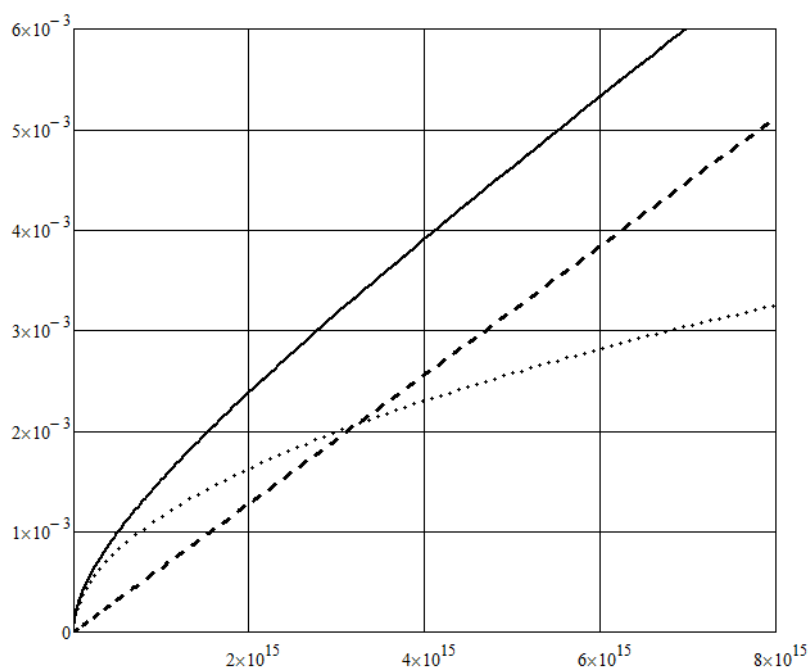


Рис.2. Зависимости минимальной требуемой мощности P_{min} (Вт) от произведения отношения сигнал/шум на полосу пропускания ($SNR \cdot \Delta f$) для p-i-n фотодиода в линейном масштабе. Верхняя кривая – полное решение уравнения (2). Нижняя кривая – решение в дробовом пределе, при учете только дробовых шумов оптической мощности сигнала. Средняя кривая – решение (2) при учете только тепловых шумов.

3) Третий участок содержит точку пересечения кривых, характеризующих тепловые и дробовые шумы. Для расчета P_{min} на этом участке необходимо пользоваться полным выражением (3).

Влияние параметров фотоприемника на приведенные характеристики показано ниже.

Увеличение нагрузки приводит к снижению тепловых шумов и уменьшению критического значения оптической мощности, при которой наступает преобладание дробовых шумов ($\sim 10^{-4}$ Вт для $R=50$ Ом, $\sim 10^{-6}$ Вт для $R=2$ кОм, $\sim 10^{-8}$ Вт для $R=10$ Мом).

Результаты расчета (Рис.4) показывают, что изменения темнового тока слабо влияют на величины P_{min} .

На рис.5 показан случай относительно больших значений нагрузки и темнового тока: $R=500$ Ом, $I_D=10$ нА.

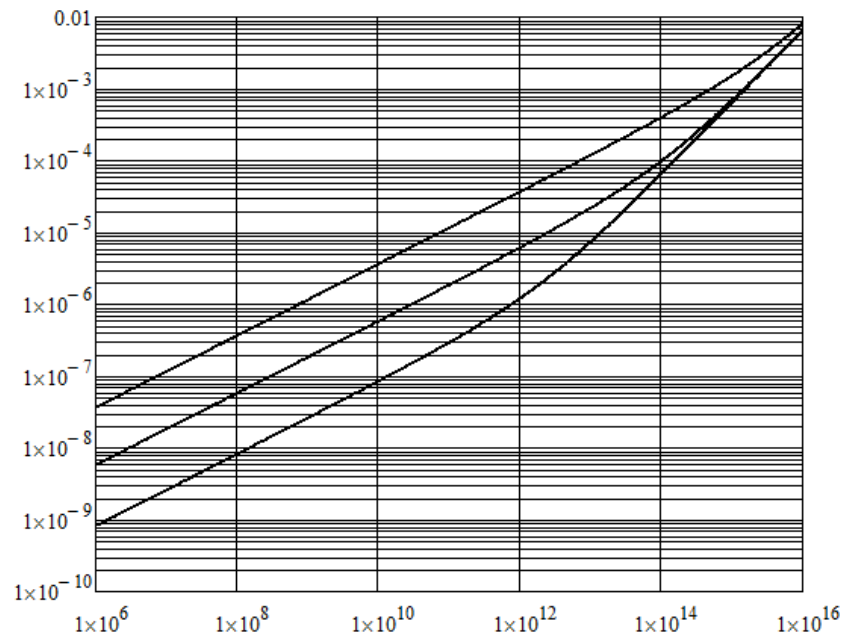


Рис.3. Зависимости минимальной требуемой мощности P_{min} (Вт) от произведения отношения сигнал/шум на полосу пропускания ($SNR \cdot \Delta f$) для pin фотодиода в логарифмическом масштабе для разных величин нагрузки. Верхняя кривая – $R=50 \text{ Ом}$, средняя кривая – $R=2 \text{ кОм}$, нижняя кривая – $R=100 \text{ кОм}$.

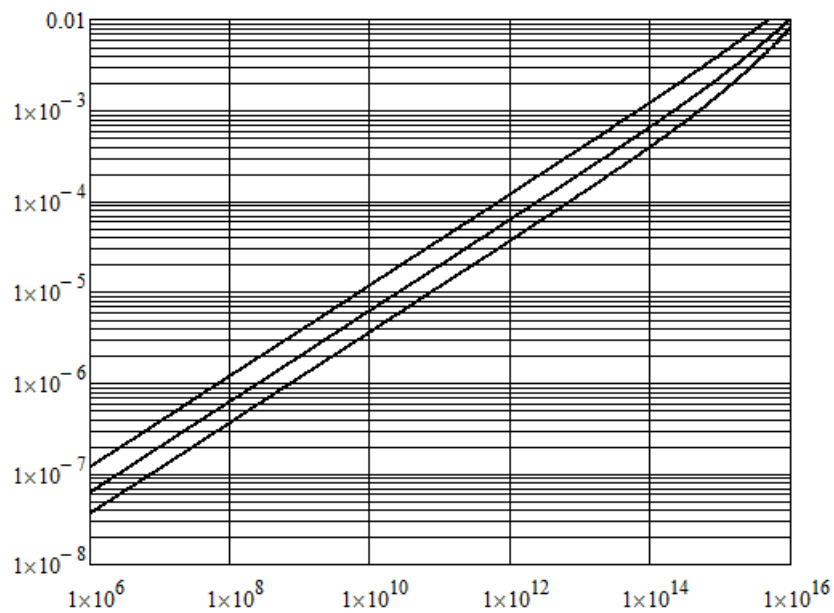


Рис.4. Зависимости минимальной требуемой мощности P_{min} (Вт) от произведения отношения сигнал/шум на полосу пропускания ($SNR \cdot \Delta f$) для pin фотодиода при разных значениях темнового тока. Темновой ток: $I_D=10^{-2} \text{ А}$ – верхняя кривая, $2 \cdot 10^{-3} \text{ А}$ – средняя кривая, 10^{-9} А – нижняя кривая.

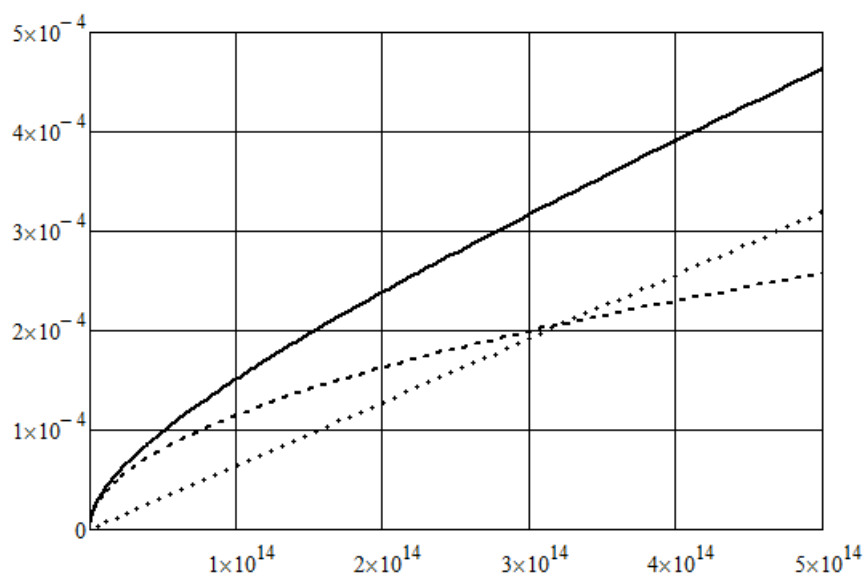


Рис.5. Зависимости минимальной требуемой мощности P_{min} (Вт) от произведения отношения сигнал/шум на полосу пропускания ($SNR \cdot \Delta f$) для pin фотодиода в линейном масштабе. По сравнению с рис.1 и 2, здесь на рис.5 темновой ток $I_D=100\text{нА}$, сопротивление нагрузки $R=500\text{ Ом}$.

Как следует из приведенных расчетных данных, в большинстве случаев применения pin-фотодиодного приемника при малых величинах оптической мощности ($P < 10^{-5}$ Вт; $P < -20\text{дБм}$) значение P_{min} определяется тепловыми шумами. В этих случаях можно применять упрощенную формулу для нахождения P_{min} :

$$P_{min} = \sqrt{(SNR \cdot \Delta f) \cdot \left(\frac{4kT}{s^2 \cdot R} \right)} \quad (4)$$

Для другого крайнего случая, когда оптическая мощность, поступающая на фотоприемник, достаточно велика ($P > -20\text{ дБм}$), отношение сигнал/шум и минимальная оптическая мощность определяются дробовыми шумами оптического сигнала и темнового тока. В этих случаях возможно применение упрощенного выражения:

$$P_{min} = (SNR \cdot \Delta f) \cdot \frac{e}{s} + \sqrt{\left((SNR \cdot \Delta f) \cdot \frac{e}{s} \right)^2 + (SNR \cdot \Delta f) \cdot \left(\frac{2e}{s^2} \cdot I_D \right)} \quad (5)$$

Отметим, что в выражении (5) проявляется сложная зависимость минимальной мощности от параметров $(SNR \cdot \Delta f)$.

В предельном случае (т.н. квантовый предел), когда пренебрегают дробовыми шумами темнового тока, достигается максимально возможное отношение сигнал/шум и минимальное значение P_{min} :

$$P_{min} = (SNR \cdot \Delta f) \cdot 2 \frac{e}{s} \quad (6)$$

Выражения (4 и 6) имеют существенное отличие – в дробовом пределе P_{min} линейно зависит от $(SNR \cdot \Delta f)$, в то время как для случая ограничения тепловыми шумами зависимость становится как квадратный корень произведения $(SNR \cdot \Delta f)$.

В общем случае целесообразно применять выражение (3).

Параметр P_{min} часто приводится в характеристиках фотоприемника. При этом для корректного использования этого параметра производители должны указать условия, при которых он измерен. Т.е. привести данные о полосе приемника, отношении сигнал/шум и тип сигнала, при которых параметр P_{min} измерен. Например, приемник MF-32DF-R13-24 имеет параметр $P_{min} = -33$ дБм при скорости цифрового NRZ потока 622 Мбит/с и допустимой вероятности ошибки $BER=10^{-9}$. Если учесть, что полоса частот, соответствующая данным сигналам ~ 300 МГц, а отношение сигнал/шум $SNR=145$ для данного $BER=10^{-9}$, то приведенная величина $P_{min} = -33$ дБм хорошо согласуется с расчетными данными на рис.1 для $(SNR \cdot \Delta f) = 4,3 \cdot 10^{10}$ Гц (-34дБм).

1.2. Эквивалентная шумовая мощность

Однако в ряде случаев производители указывают другой параметр – шумовая эквивалентная мощность NEP в единицах Вт/ $\sqrt{\text{Гц}}$. По определению, под этим понимают оптическую мощность P , при которой отношение сигнал/шум (отношение электрических мощностей) равняется единице $SNR=1$ в полосе частот $\Delta f=1$ Гц. На приведенных выше расчетных данных величинам NEP соответствуют точки на кривых $P(SNR \cdot \Delta f)$ при значениях аргумента $SNR \cdot \Delta f = 1$. Эта величина P имеет диапазон значений 10^{-14} Вт/ $\sqrt{\text{Гц}}$ - 10^{-11} Вт/ $\sqrt{\text{Гц}}$. Отметим важную особенность параметра NEP . По условию его определения он соответствует очень малым величинам оптической мощности, при которых, как правило, преобладают тепловые шумы. Именно поэтому его размерность представлена как $\sqrt{\text{Гц}}$ в знаменателе. Фактически для расчета NEP необходимо использовать в случае pin-фотоприемников формулу (4) при значении $SNR \cdot \Delta f = 1$:

$$P_{min}(SNR \cdot \Delta f = 1) = NEP = \sqrt{\left(\frac{4kT}{s^2 \cdot R}\right)}, \quad (7)$$

В некоторых случаях для пояснения размерности NEP приводят выражение

$$\frac{P_{min}(SNR = 1)}{\sqrt{\Delta f}} = \sqrt{\left(\frac{4kT}{s^2 \cdot R}\right)}, \quad (8)$$

Введенная таким образом величина NEP позволяет находить необходимую для энергетического расчета оптическую минимальную требуемую мощность P_{min} :

$$P_{min} = NEP \cdot \sqrt{(SNR \cdot \Delta f)} \quad (9)$$

Очевидно, что последнее выражение получено из (4) с учетом (7) и (8). В логарифмической шкале выражение (9) имеет вид:

$$P_{min}[\text{дБм}] = NEP[\text{дБм}] + 5 \cdot \log \Delta f[\text{Гц}] + 0.5 \cdot SNR[\text{дБ}] \quad (10)$$

Важно подчеркнуть, что простые выражения (9) и (10) успешно работают лишь в области параметров, при которых выполняется ограничение тепловыми шумами и уравнение (9). В противном случае следует пользоваться полным выражением (3) для нахождения P_{min} при заданных параметрах приемника R , I_D , s и системных характеристиках SNR и Δf . Граничным значением произведения ($SNR \cdot \Delta f$) является величина порядка 10^{13} Гц и P_{min} примерно 10 мкВт, как отмечалось выше. При больших значениях этих величин расчет по формуле (9) может привести к некорректным результатам.

При таком подходе может возникнуть вопрос о целесообразности введения такого параметра как NEP и использования приближенных выражений (8-10). Однако, есть ряд доводов за полезность применения NEP . Во-первых, простота использования формулы (9) при известном значении NEP (всего одного числа NEP вместо набора параметров фотоприемника не всегда известных полностью). Во-вторых, знание NEP и использование формул (9-10) расширяет возможности применения данного приемника, рассматривая разные варианты изменения SNR и полосы частот Δf , что невозможно сделать при определенном значении минимальной мощности P_{min} , измеренной при заданных параметрах SNR и Δf и типе кодирования сигнала. И в третьих, NEP является некоторым шумовым параметром фотоприемника, что гораздо слабее отражено в параметре P_{min} . Чем меньше значение NEP , тем менее шумящим является приемник. Фактически NEP определяет среднеквадратичное значение шумового тока на нагрузке фотодиода в заданной полосе частот.

$$\langle i_{noise}^2 \rangle = \sqrt{\frac{4kT \cdot \Delta f}{R}} = s \cdot NEP \cdot \sqrt{\Delta f}, \quad (11)$$

где s – чувствительность приемника [А/Вт].

Конечно, последнее выражение (11) также справедливо только в приближении тепловых шумов.

Наиболее сильно на величину NEP влияет значение сопротивления нагрузки R . На рис. 6 представлена зависимость $NEP(R)$, полученная при использовании формулы (3) и условия ($SNR \cdot \Delta f = 1$).

Как видно из рис.6, значение NEP существенно уменьшается (на два порядка) при росте сопротивления нагрузки вплоть до $R=10^6$ Ом. Далее рост прекращается, что отражает переход в режим ограничения дробовыми шумами. Следует отметить, такое снижение NEP от R не всегда является полезным, поскольку сопровождается уменьшением полосы частот приемника $\Delta f = 1/2\pi RC$ (C – емкость обратно смещенного фотодиода). Тем не менее, если емкость C мала, то целесообразно увеличивать R до достижения приемлемой полосы приемника.

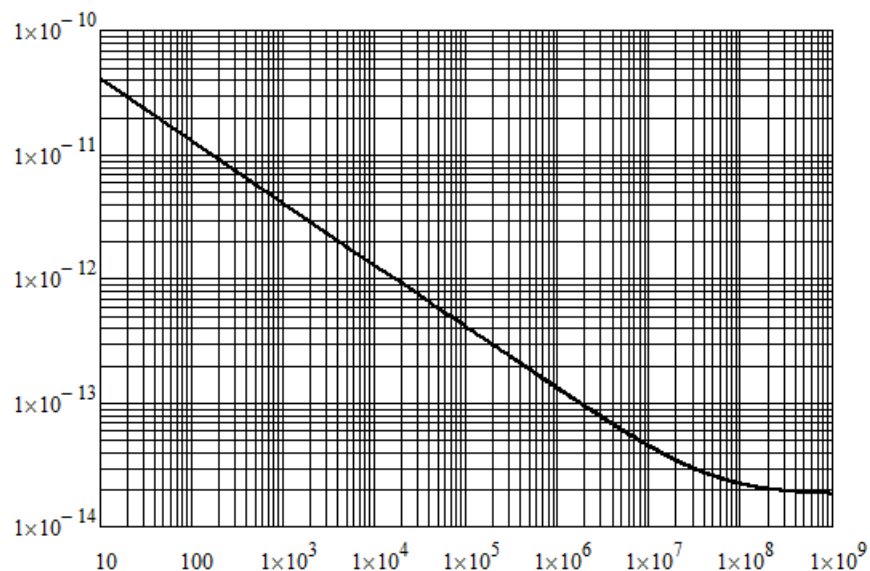


Рис.6. Зависимость NEP [Вт/√Гц] от величины сопротивления R [Ом] для pin-фотодиодного приемника ($s=0,5$ А/Вт, $I_D=2$ нА, $T=300$ К).

Наконец отметим **некоторые сложности**, возникающие при использовании параметров NEP и P_{\min} . Наибольшую путаницу вызывает введение еще одного параметра в дополнение к рассмотренным выше. Речь идет об оптической мощности, определенной из выражения (3) при условиях $SNR=1$ и $\Delta f \neq 1$. При этом шум находится в заданной полосе Δf , например 100 МГц. И эта величина определяется по разному: «полная эквивалентная мощность шума, TNEP» (Г.Элион, Х. Элион, Волоконная оптика в системах связи) или минимальная регистрируемая мощность P_{\min} (J. Palais, Fiber optical communication). Кроме того, для введения NEP иногда используется выражение, содержащее только отношение среднеквадратичного значения полного шума $(\langle i_{\text{noise}}^2 \rangle)^{1/2}$ [А] к чувствительности приемника s [А/Вт]. Последний подход отбрасывает дробовые шумы оптической мощности и может приводить к ошибочным оценкам (Р.Убайдуллаев, Волоконно-оптические сети).

Еще одной **распространенной трудностью** является оценка NEP только по дробовым шумам темнового тока. Она возникает в случае предоставления разработчику фотоприемника конструкции фотодиода без каких либо элементов и устройств (даже без нагрузки). В этом случае, чтобы как-то характеризовать приемник приводится NEP , оцененный только по темновому току (другие параметры просто неизвестны), который обычно существенно завышен. Как правило, такой NEP имеет значение $10^{-14} - 10^{-15}$ Вт/Гц^{1/2} и применение его приводит к некорректным оценкам P_{\min} .

2. Лавинные фотодиоды (ЛФД)

Основной особенностью лавинных фотодиодов является наличие механизма внутреннего усиления фототока. Это приводит к заметному увеличению их чувствительности $s_{\text{ЛФД}} = M \cdot s_{\text{pin}}$ в коэффициент усиления раз по

сравнению с pin-фотодиодом. Величина M может достигать 10^2 - 10^3 . Однако, в ЛФД появляется и дополнительный источник шума – шум лавинного умножения, зависящий от свойств материала фотодиода и коэффициента усиления M . Эти свойства ЛФД отражены в выражении для отношения сигнал/шум, аналогичному случаю pin-фотодиода:

$$SNR = \frac{(s \cdot M \cdot P)^2}{2e\Delta f M^n (sP + I_D) + 4\Delta f (kT/R)} \quad (12)$$

Где параметр n зависит от свойств фотодиода и имеет значения $n=2,3$ для Si-фотодиода, $n=2,7$ для InGaAs – фотодиода и $n=3$ для Ge – фотодиода. Часто вводят коэффициент шума для ЛФД в виде $F=M^{n-2}$. Для идеального ЛФД фотоприемника без шума лавинного умножения $n=2$ и $F=1$.

Также как для pin-диоода можно записать выражение для определения минимальной требуемой мощности P_{\min} , используя выражение (12):

$$P = SNR \cdot \Delta f \frac{e \cdot M^{n-2}}{s} + \sqrt{\left(SNR \cdot \Delta f \frac{e \cdot M^{n-2}}{s} \right)^2 + SNR \cdot \Delta f \left(\frac{2e \cdot M^{n-2}}{s^2} \cdot I_D + \frac{4kT}{s^2 \cdot M^2 \cdot R} \right)} \quad (13)$$

Выражение (13) определяет величину оптической мощности, при которой выполняется заданное отношение электрических мощностей сигнала к шуму SNR в заданной полосе приемника Δf и других известных параметрах s, R, T, I_D, M, n . Целесообразнее всего из (3) найти минимальную требуемую оптическую мощность P_{\min} , обеспечивающую данные SNR и Δf . Рассчитанная из (13) зависимость P_{\min} от произведения $(SNR \cdot \Delta f)$ показана на рис.7 для Si-ЛФД приемника при следующих параметрах $s=0,5$ А/Вт, $R=50$ Ом, $M=70$, $n=2.3$, $I_D=10^{-9}$ А, $T=300$ К.

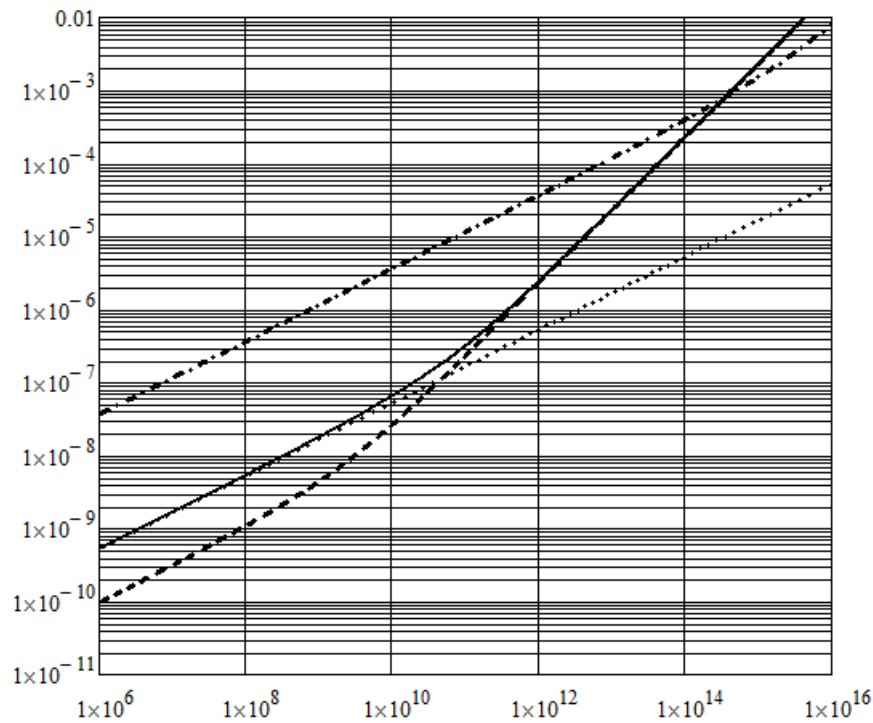


Рис.7. Зависимости минимальной требуемой мощности P_{min} (Вт) от произведения отношения сигнал/шум на полосу пропускания ($SNR \cdot \Delta f$) (Гц) для ЛФД на основе Si в логарифмическом масштабе. Средняя сплошная кривая – полное решение уравнения (12). Штриховая кривая – решение (12) в дробовом пределе, при учете только дробовых шумов. Точечная кривая – решение (12) при учете только тепловых шумов. Для сравнения верхняя штрихпунктирная кривая представляет случай pin-фотодиода ($M=1$).

Отметим основные особенности ЛФД фотодиодов, вытекающие из представленных на рис.7 данных.

1) При малых значениях ($SNR \cdot \Delta f$) минимальная требуемая мощность определяется тепловыми шумами, как и в случае pin-диоода. Однако, граница такого приближения заметно ниже, чем в pin-диоде. Действительно, для ЛФД – это значение ($SNR \cdot \Delta f$) $\sim 10^{11}$ Гц, а для pin-диоода ($SNR \cdot \Delta f$) $\sim 10^{13}$ Гц.

2) В указанном диапазоне значений обобщенного параметра ($SNR \cdot \Delta f$) $< 10^{11}$ Гц, ЛФД имеет значительно меньшие величины ($SNR \cdot \Delta f$) (почти на два порядка), чем pin-фотодиод. Так для ($SNR \cdot \Delta f$) = 10^{10} Гц $P_{min} = 6.5 \cdot 10^{-8}$ Вт в случае ЛФД и $P_{min} = 3.6 \cdot 10^{-6}$ Вт в случае pin-диоода. Однако с ростом параметра ($SNR \cdot \Delta f$) выигрыш ЛФД уменьшается и при ($SNR \cdot \Delta f$) $> 10^{15}$ Гц он проигрывает pin-фотодиоду.

3) В соответствие с пунктом 1) можно ввести шумовой параметр ЛФД «эквивалентная шумовая мощность» NEP в единицах $Вт/Гц^{1/2}$. На рис.7 этой величине соответствуют точки кривых $P_{min}(SNR \cdot \Delta f)$ при $(SNR \cdot \Delta f)=1$ как следует из определения NEP . Для указанных параметров $NEP_{ЛФД}=5,24 \cdot 10^{-13}$ $Вт/Гц^{1/2}$ $NEP_{pin} = 3,6 \cdot 10^{-11}$ $Вт/Гц^{1/2}$. Т.е. как и для P_{min} хорошо виден выигрыш по этому параметру ЛФД по сравнению с pin-фотодиодом почти на два порядка. Также как и в случаи pin-диоода, можно использовать $NEP_{ЛФД}$ для расчета P_{min} по формулам (9,10). Однако, эти формулы корректны только до значений обобщенного параметра $(SNR \cdot \Delta f)$ менее 10^{11} Гц. Выше этих величин зависимость оптической мощности от $(SNR \cdot \Delta f)$ становится линейной и P_{min} целесообразно находить, используя полную формулу (13). Подчеркнем, что отмеченная особенность **линейной** зависимости от параметра $(SNR \cdot \Delta f)$ свойственна фотоприемникам «ограниченным» дробовыми шумами оптической мощности. В другом крайнем случае ограничения тепловыми шумами эта зависимость сменяется на квадратный корень $(SNR \cdot \Delta f)^{1/2}$. Точка перехода между этими случаями соответствует условию равенства тепловых и дробовых шумов в заданной полосе. На рис.7 она выделяется областью изменения угла наклона кривых $P_{min} (SNR \cdot \Delta f)$. На этом рисунке обе оси представлены в логарифмическом масштабе.

4) Еще одна особенность ЛФД приемников заключается в зависимости результатов, представленных выше на рис.7, от величины коэффициента усиления. Существует некоторый оптимальный коэффициент M_{opt} , которому соответствует минимальное значение P_{min} при заданной величине обобщенного параметра $(SNR \cdot \Delta f)$. На рис.8 приведены зависимости P_{min} от M при трех значениях $(SNR \cdot \Delta f) = 10^{10}, 10^{11}, 10^{12}$ Гц. Хорошо видно, что минимумы кривых, соответствующие оптимальным величинам коэффициента усиления M_{opt} , изменяются в большом диапазоне от $P_{min} \sim 2 \cdot 10^{-6}$ Вт до $P_{min} \sim 4 \cdot 10^{-8}$ Вт при изменении M_{opt} в интервале $\sim 30-300$. Для расчета данных на рис.7 был выбран коэффициент усиления $M=70$.

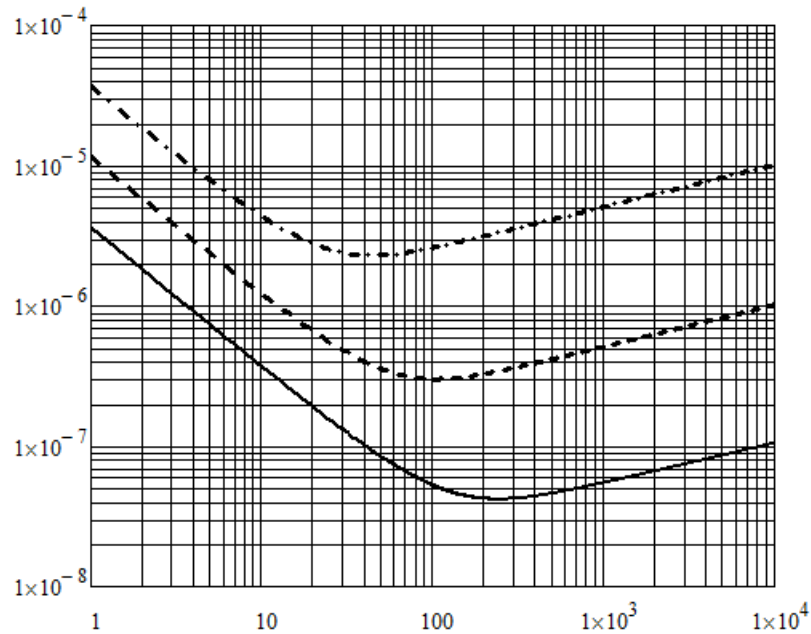


Рис.8. Зависимости минимальной требуемой мощности P_{min} от коэффициента усиления Si лавинного фотодиода для трех значений обобщенного параметра $(SNR \cdot \Delta f) = 10^{10}, 10^{11}, 10^{12}$ Гц (нижняя, средняя и верхняя кривые, соответственно). Минимумы кривых определяют оптимальные значения коэффициента усиления $M_{opt} \approx 250, 100, 50$, для соответствующих зависимостей.

Отмеченные особенности кремниевого лавинного фотодиода проявляются и в ЛФД других типов. Ниже представлены результаты расчета для Ge ЛФД на рис.9, 10 и InGaAs – ЛФД на рис. 11,12. Использовались следующие параметры Ge-ЛФД: $s=1$ А/Вт, $R=50$ Ом, $M=20$, $n=3$, $I_D=10 \cdot 10^{-9}$ А, $T=300$ К.

Как показывают приведенные результаты, наилучшими параметрами обладает Si-ЛФД, затем идет InGaAs-ЛФД и на третьем месте находится Ge-ЛФД. Как правило, на практике применяют чаще всего кремниевые ЛФД в диапазоне длин волн 800 – 1100 нм, и InGaAs-ЛФД в диапазоне длин волн 1300-1600 нм.

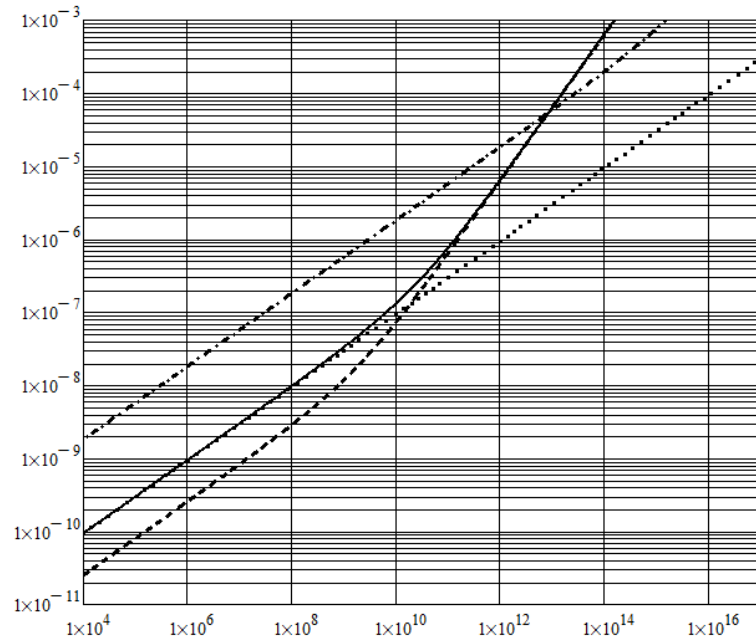


Рис.9. Зависимости минимальной требуемой мощности P_{min} (Вт) от произведения отношения сигнал/шум на полосу пропускания ($SNR \cdot \Delta f$) (Гц) для ЛФД на основе Ge в логарифмическом масштабе. Средняя сплошная кривая – полное решение уравнения (12). Штриховая кривая – решение (12) в дробовом пределе, при учете только дробовых шумов. Точечная кривая – решение (12) при учете только тепловых шумов. Для сравнения верхняя штрихпунктирная кривая представляет случай pin-фотодиода ($M=1$).

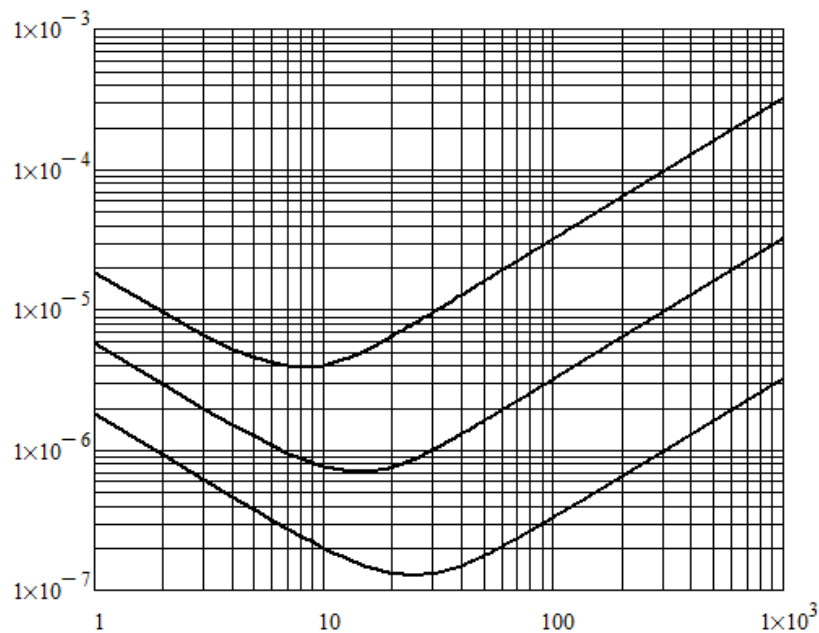


Рис.10. Зависимости минимальной требуемой мощности P_{min} от коэффициента усиления G_e лавинного фотодиода для трех значений обобщенного параметра ($SNR \cdot \Delta f$) = 10^{10} , 10^{11} , 10^{12} Гц. Минимумы кривых определяют оптимальные значения коэффициента усиления $M_{opt} \approx 25, 15, 8$ для соответствующих зависимостей.

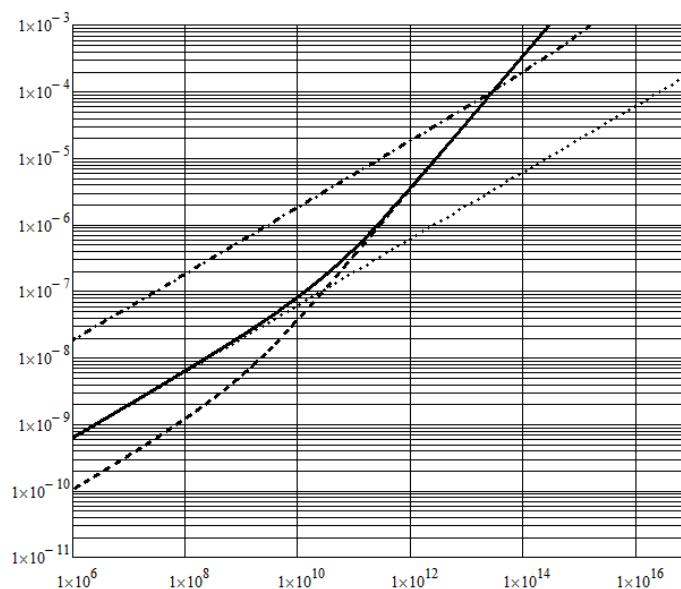


Рис.11. Зависимости минимальной требуемой мощности P_{min} (Вт) от произведения отношения сигнал/шум на полосу пропускания ($SNR \cdot \Delta f$) (Гц) для ЛФД на основе InGaAs в логарифмическом масштабе. Средняя сплошная кривая – полное решение уравнения (12). Штриховая кривая – решение (12) в дробовом пределе, при учете только дробовых шумов. Точечная кривая – решение (12) при учете только тепловых шумов. Для сравнения верхняя штрихпунктирная кривая представляет случай pin-фотодиода ($M=1$).

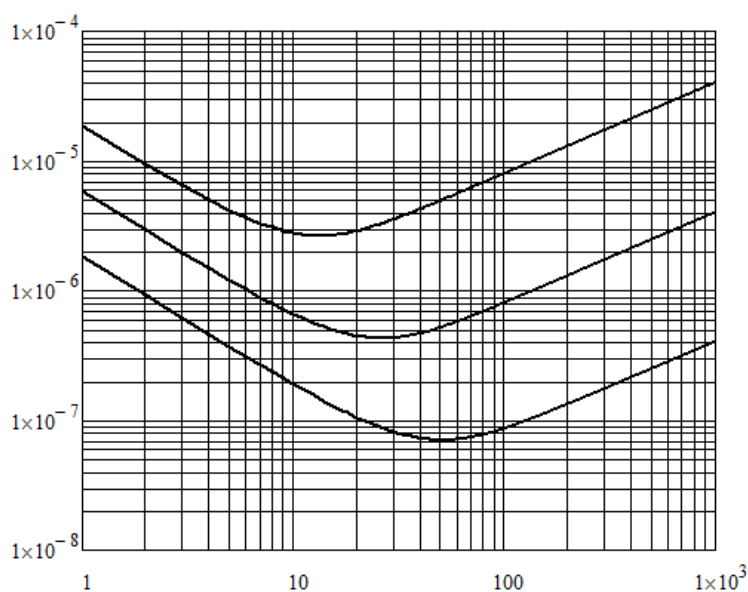


Рис.12. Зависимости минимальной требуемой мощности P_{min} от коэффициента усиления InGaAs лавинного фотодиода для трех значений обобщенного параметра ($SNR \cdot \Delta f$) = 10^{10} , 10^{11} , 10^{12} Гц. Минимумы кривых определяют оптимальные значения коэффициента усиления $M_{opt} \approx 55, 30, 15$ для соответствующих зависимостей.

Результаты расчета для InGaAs ЛФД на рис.11, 12 получены при следующих параметрах: $s=1$ А/Вт, $R=50$ Ом, $M=30$, $n=2,7$, $I_D=3 \cdot 10^{-9}$ А, $T=300$ К.

7. Литература

1. Р.Фриман. Волоконно-оптические системы связи. Пер. с англ. п/р Н.Н. Слепова. Техносфера, 2007, 512 с.
2. М. Кауфман, А.Сидман. Практическое руководство по расчетам схем в электронике. Справ. в 2 т., Т.2: Пер. с англ. / Под ред. Ф.Н. Покровского. – М.: Энергоатомиздат, 1993, 288 с.
3. М.М. Бутусов, С.М. Верник, С.Л.Галкин, В.Н.Гомзин, Б.М. Машковцев, К.Н.Щелкунов. Волоконно-оптические системы передачи: Учебник для вузов. – М.: Радио и связь. – 1992, 416 с.
4. А.Б.Иванов. Волоконная оптика. – М.: Сайрус Системс. – 1999, 658 с.
5. Гауэр Дж. Оптические системы связи: Пер. с англ. – М.: Радио и связь. 1989. – 504 с.
6. Иванов А.Б. Волоконная оптика. Компоненты, системы передачи, измерения. М.: 1999. – 672 с.
7. Скляр О.К. Волоконно-оптические сети и системы связи: Учебное пособие. СПб. изд.»Лань», 2010. - 272 с.
8. Palais Joseph C. Fiber optic communications. 5th ed. Upper Saddle River; London: Pearson/Prentice Hall, 2005. - 441 p.
9. Agrawal G. P. Fiber-Optic Communications Systems, Third Edition. John Wiley & Sons, Inc. 2002. - 530 p.
10. Родина О. В. Волоконно-оптические линии связи. Практическое руководство. – М.: - Телеком, 2014. – 400 с.
11. Соколов С.А. Волоконно-оптические линии связи и их защита от внешних влияний: учебное пособие. – М.: Инфра-инженерия, 2019. – 172 с.

8. Содержание

1. Введение.....	3
1.1 Основные положения.....	3
1.2 Задание для расчета.....	7
1.3 Порядок выполнения курсового задания.....	8
2. Предварительный выбор элементов ВОСП и оценка их параметров.....	10
2.1 Источники света для ВОСП.....	11
2.2 Фотоприемные устройства для ВОСП.....	13
2.3 Волоконные световоды для ВОСП.....	14
3. Энергетический расчет ВОСП.....	18
4. Расчет быстродействия ВОСП.....	34
5. Примеры расчета ВОСП.....	42
6. Приложения.....	58
7. Литература.....	82
8. Содержание.....	83

Костромитин Алексей Олегович

Котов Олег Иванович

Лиокумович Леонид Борисович

Соколов Александр Вячеславович

**МЕТОДЫ РАСЧЕТА ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ
СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ
С РАСПРЕДЕЛЕННЫМ ДОСТУПОМ**

Учебное пособие

Тираж 100.